

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV VODNÍCH STAVEB

INSTITUTE OF WATER STRUCTURES

**VYHODNOCENÍ POVODŇOVÉ SITUACE
NA VYBRANÉ ČÁSTI TOKU**

ANALYSIS OF FLOOD SITUATION ON SELECTED PART OF RIVER

DIPLOMOVÁ PRÁCE

DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Markéta Štěpánová

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. DAVID DUCHAN, Ph.D.

BRNO 2017



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	N3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3607T027 Vodní hospodářství a vodní stavby
Pracoviště	Ústav vodních staveb

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student	Bc. Markéta Štěpánová
Název	Vyhodnocení povodňové situace na vybrané části toku
Vedoucí práce	Ing. David Duchan, Ph.D.
Datum zadání	31. 3. 2016
Datum odevzdání	13. 1. 2017

V Brně dne 31. 3. 2016

prof. Ing. Jan Šulc, CSc.
Vedoucí ústavu

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA
Děkan Fakulty stavební VUT

PODKLADY A LITERATURA

ES 2007. Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2007/60/ES ze dne 23. října o vyhodnocování a zvládání povodňových rizik.

MŽP ČR 2009. Metodika tvorby map povodňového nebezpečí a povodňových rizik. VÚV T.G. Masaryka v.v.i, Brno. Ministerstvo životního prostředí ČR, Praha.

Zákon 254/2001 Sb. o vodách a o změně některých zákonů (vodní zákon).

Ven Te Chow, Open-Channel Hydraulics, 1959

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

V rámci vybraného úseku toku bude provedena simulace povodňových průtoků. Na základě výsledků bude provedeno zhodnocení povodňové situace s ohledem na možné úpravy toku a možnou stavbu protipovodňových ochranných opatření.

Požadované výstupy:

Průvodní zpráva

Mapové výstupy analýzy povodňové situace

STRUKTURA DIPLOMOVÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).

2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).

Ing. David Duchan, Ph.D.

Vedoucí diplomové práce

ABSTRAKT

Práce se zabývá vyhodnocením povodňové situace na úseku řeky Svitavy v Brně, za tří průtoků Q5, Q20 a Q100, a následně poskytuje návrh možné protipovodňové ochrany. Stávající situace je zhodnocena pomocí hydraulických výpočtů za využití programu HEC-RAS, umožňující kombinaci 1D a 2D numerického modelování průtoků.

KLÍČOVÁ SLOVA

Záplavové území, povodeň, modelování, HEC-RAS

ABSTRACT

The thesis deals with an evaluation of flood situation at the area of the river Svitava in Brno throughout three different flows Q5, Q20 a Q100 and that proposes a possible solution for flood protection. Current state of the river stream is evaluated through hydraulic calculation combining 1D and 2D numerical modelling of flow rate with the use of HEC-RAS software.

KEYWORDS

Flood areas, flood, modelling, HEC-RAS

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP

Bc. Markéta Štěpánová *Vyhodnocení povodňové situace na vybrané části toku*. Brno, 2017. 69 s., 36 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodních staveb. Vedoucí práce Ing. David Duchan, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 13. 1. 2017

Bc. Markéta Štěpánová
autor práce

Na tomto místě bych chtěla poděkovat panu Ing. Davidu Duchanovi, Ph.D. za odborné vedení při zpracování diplomové práce a vstřícné jednání po dobu jejího zpracování. Dále bych chtěla poděkovat své rodině za jejich podporu a obětavost v průběhu celého mého studia. V neposlední řadě bych ráda poděkovala svému příteli za poskytnutí potřebné opory a motivace zejména v poslední části studia.

OBSAH

1	ÚVOD.....	3
2	CÍLE PRÁCE	4
3	PODKLADY	5
4	TEORIE	6
4.1	Proudění kapaliny.....	6
4.1.1	1D proudění	7
4.1.2	2D proudění	14
5	ZÁJMОВÉ ÚZEMÍ	16
5.1	Fyzicko-geografické podmínky.....	17
5.1.1	Reliéf	17
5.1.2	Geologie a hydrogeologie.....	18
5.2	Klimatické poměry.....	19
5.3	Hydrologické charakteristiky území.....	20
5.3.1	Monitorování na toku	22
5.3.2	Významná vodní díla.....	23
5.4	Charakter úseku.....	24
5.5	Objekty na toku.....	25
5.5.1	Jezy	26
5.5.2	Mosty a lávky	29
5.6	Historie povodní na Svitavě	32
5.6.1	Příklady významných povodní na řece Svitavě.....	32
6	HYDRAULICKÉ VÝPOČTY	35
6.1	Použitý software	35
6.2	Postup zpracování.....	36
6.2.1	Převedení dat do textového souboru.....	36
6.2.2	Úprava DMR 5G	38
6.2.3	Vytvoření modelu v programu HEC-RAS	38
6.2.4	Zpracování výsledků.....	44
6.3	Výsledky hydraulických výpočtů.....	44
7	NÁVRH PPO	48
7.1	Protipovodňová opatření.....	48
7.1.1	Strukturální	48

7.1.2	Nestrukturální	50
7.2	Ideový návrh PPO.....	50
7.3	Zhodnocení návrhu PPO.....	52
8	ZÁVĚR.....	53
9	CITOVANÁ LITERATURA	54
9.1	Podkladová studie	54
9.2	Literatura.....	54
9.3	Webové stránky	55
9.4	Fotografie.....	56
SEZNAM TABULEK		57
SEZNAM OBRÁZKŮ.....		58
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ		60
SEZNAM PŘÍLOH		62

1 ÚVOD

V České republice patří mezi jedny z nejničivějších přírodních jevů povodně. Tento relativně frekventovaný fenomén má často za následek vysoké škody na soukromém či veřejném majetku a bohužel mnohé z takových katastrof se neobejdou i bez ztrát na životech. Nadto povodně nejsou jenom jevem současnosti, ale dle mnohých záznamů byly pozorovány od dávné minulosti a je zcela reálné předpokládat jejich výskyt i v budoucnosti. Je proto na místě se soustavně zabývat tematikou vhodných opatření, která mohou předejít jejich vzniku nebo alespoň zmírnit následky takových událostí.

V historii lze tyto snahy pozorovat například na dochovaných zemních hrázích kolem některých toků a i dnes je tomuto tématu věnována značná pozornost. Povodně jsou studovány z hlediska příčin jejich vzniku, jako jsou meteorologické podmínky. Dále je například zkoumán jejich průběh v oblasti výskytu a vliv místních podmínek na jejich postup po toku

V zájmové oblasti, úseku řeky Svitavy v Brně, kterou se tato práce bude zabývat, je frekventovaná přítomnost povodní s nemalými škodami na majetku. I když v minulosti proběhla snaha úsek ochránit, zhotovená opatření se prokázala jako nedostatečná. Je tedy žádoucí území prověřit a zhodnotit stávající stav. V případě nedostatků pak navrhnout možná řešení ochrany v nezbytných částech.

2 CÍLE PRÁCE

Cílem této práce je zhodnocení povodňové situace na části toku řeky Svitavy km 8,085 – km 10,950.

Za tímto účelem bude využit program HEC-RAS pro vytvoření 1D modelu koryta řeky a 2D modelu území mimo koryto, které umožní stanovení mapy rozlivů. Předmětem zkoumání bude několik stavů s průtoky Q_5 , Q_{20} a Q_{100} . Na základě simulace těchto průtoků bude vytvořena mapa rozlivů, hloubek a rychlostí.

Následně bude v místech rozlivů do intravilánu proveden ideový návrh vhodných protipovodňových opatření.

Cíle práce jsou:

- Vytvoření modelu proudění vody pro zvolenou oblast na řece Svitavě.
- Stanovení rozlivů, hloubek rozlivů a rychlostí vody při průtocích Q_5 , Q_{20} a Q_{100} .
- Ideový návrh protipovodňových opatření (PPO)

3 PODKLADY

- [A.1] Podélný profil km 0,000 – km 11,200 ve formátu *.dxf, Generel odvodnění města Brna – část toky, č. 15 Svitava, červen 2007
- [A.2] Příčné profily PF 1 – PF 245 ve formátu *.dxf, Generel odvodnění města Brna – část toky, č. 15 Svitava, červen 2007
- [A.3] Vrstva se staničenou osou toku ve formátu *.shp, poskytnutá Povodím Moravy s.p., Generel odvodnění města Brna. Osa trasována na FAST VUT v Brně
- [A.4] Digitální model reliéfu České republiky 5. generace (DMR 5G) ve formátu *.shp, ZABAGED Geoportál ČÚZK
- [A.5] Vrstvy využití území ve formátu *.shp, ZABAGED Geoportál ČÚZK
- [A.6] Vrstva A03 vodní toky (hrubé úseky) ve formátu *.shp, struktura DIBAVOD VÚV T. G. Masaryka
- [A.7] Vrstva D01 záplavová území pětileté vody, D02 záplavová území dvacetileté vody a D03 záplavová území stoleté vody ve formátu *.shp, struktura DIBAVOD VÚV T. G. Masaryka
- [A.8] Uživatelský manuál programu HEC-RAS, verze 5.0, dostupný ve formátu *.pdf

4 TEORIE

Pro pochopení dějů uvnitř proudící vody v korytě je třeba se zaměřit na hydrodynamické chování kapalin a jejich vzájemné působení s pevnými tělesy při společném relativním pohybu.

4.1 PROUDĚNÍ KAPALINY

Pohyb kapaliny lze popsat zejména za pomoci dvou fyzikálních zákonů:

- Zákon zachování hmotnosti – Občas také tzv. rovnice kontinuity říká, že součet hmotnosti na vstupu do uzavřené soustavy je roven součtu hmotnosti na výstupu z uzavřené soustavy. Nebo také, že změna hmotnosti za jednotku času $\frac{\partial m}{\partial t}$ v časovém kroku dt je rovna rozdílu hmotnosti vody přitékající m_p a vody odtékající m_o [2.1].

$$\frac{\partial m}{\partial t} dt = m_p - m_o \quad (4.1)$$

- Zákon zachování hybnosti – Který říká, že celková hybnost soustavy se nemění. Věta o hybnosti může být vyjádřena jako rovnost mezi na jedné straně součinem hmotnosti bodu m a změny vektoru rychlosti z \mathbf{u}_1 na \mathbf{u}_2 , na druhé straně stálou silou \mathbf{F} a časovým intervalem mezi t_1 a t_2 [2.1].

$$m(\mathbf{u}_2 - \mathbf{u}_1) = \mathbf{F}(t_2 - t_1) \quad (4.2)$$

Jejich kombinací popisující pohyb kapaliny ve 3D prostoru jsou tzv. Navier-Stokesovy rovnice.

Navier-Stokesovy rovnice

Rovnice pro tři směry souřadných os x , y a z popisují síly působící na nekonečně malý hranol, síla třecí, tlaková, vlastní tíha kapaliny a odstředivá síla, které jsou v rovnováze se setrvačnými silami:

$$\begin{aligned} f_x - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial z^2} \right) &= \frac{\partial u_x}{\partial t} + u_x \frac{\partial u_x}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_x}{\partial y} + u_z \frac{\partial u_x}{\partial z}, \\ f_y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 u_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial z^2} \right) &= \frac{\partial u_y}{\partial t} + u_x \frac{\partial u_y}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_y}{\partial y} + u_z \frac{\partial u_y}{\partial z}, \\ f_z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left(\frac{\partial^2 u_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} \right) &= \frac{\partial u_z}{\partial t} + u_x \frac{\partial u_z}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_z}{\partial y} + u_z \frac{\partial u_z}{\partial z}. \end{aligned} \quad (4.3)$$

Kde u_x, u_y, u_z jsou rychlosti ve směru osy x, y, z . p je tlak působící na hranol, ρ je objemová tíha kapaliny, f_x, f_y, f_z jsou vnější síly působící na hranol ve směru os x, y, z . ν je kinematická viskozita kapaliny a t je jednotka času.

Rovnice popisují pohyb kapaliny ve 3D prostoru. Vzhledem k náročnosti řešení lze u dostatečně zdůvodněných případů využít zjednodušující předpoklady, opomenutím pohybu v jednom nebo dvou směrech souřadného systému, ze kterých následně vyplývají rovnice pro 1D a 2D proudění. V rámci práce bude využita kombinace 1D a 2D neustáleného proudění.

Další text je zaměřen na popis využitých metod v programu HEC-RAS.

4.1.1 1D proudění

1D proudění se předpokládá, je-li rychlost pohybu v jednom směru výrazně vyšší než v druhých dvou směrech. Většinou se jedná o proudění v potrubí či přirozeném korytě a směr proudění je totožný s pomyslnou osou toku (potrubí).

Typy proudění v korytě

Pohyb vody v korytě se dá zjednodušeně charakterizovat jako ustálené či neustálené a rovnoměrné či nerovnoměrné proudění kapaliny^[2,1], kde:

- Ustálené proudění – je takové proudění, kde hydraulické veličiny – průtok, průřezová rychlost a průřezová plocha – jsou na čas nezávislé a závisí pouze na poloze.
- Neustálené proudění – je takové proudění, kde naopak od ustáleného proudění, jsou hydraulické veličiny závislé nejenom na poloze, ale i na čase.
- Rovnoměrné proudění – je speciální případ proudění, kde se po celém úseku průtočné průřezy (také sklon koryta a drsnosti) nemění. V takovémto případě je průtok a rychlost konstantní po celém úseku.
- Nerovnoměrné proudění – je proudění, kde se při konstantním průtoku (ustáleném proudění) mění průřezová plocha a rychlost v závislosti na poloze, při neustáleném proudění pak přibývá i závislost na čase.

Další rozdělení se řídí proudovým vláknem a jeho stykem s okolím. Lze takto popsat tři základní stavy:

- Proudění s volnou hladinou – kde proud vody je ve styku zároveň s oběma dalšími skupenstvími. Pevným skupenstvím, je samotné koryto, kterým proud protéká, a

plynným je styk hladiny se vzduchem. V tomto případě proudění na vodu z vnějšího prostředí působí pouze atmosférický tlak.

- Tlakové proudění – se uvažuje, je-li proud vody ze všech stran ohraničen pevným rozhraním. Jedná se typicky o proudění v potrubí.
- Paprsek vody – je zvláštní případ, kdy voda vytéká z otvoru do volného prostoru a proud je tak tvořen paprskem ohraničeným pouze plynným skupenstvím.

Průběh povodňové vlny lze zařadit do neustáleného nerovnoměrného proudění o volné hladině.

Ustálené rovnoměrné proudění

Rovnice (4.4)^[2.1] vyjadřuje průtok jako objem kapaliny, který proteče daným místem (průtočným průřezem A) za jednotku času:

$$Q = Av = AC\sqrt{Ri} = K\sqrt{i} \quad (4.4)$$

Kde: v je průměrná rychlost po ploše průtočného průřezu, C je Chézyho rychlostní součinitel, R je hydraulický poloměr, K je modul průtoku a i je sklon čáry energie, který se u prizmatického koryta předpokládá shodný se sklonem dna.

Jak je patrné z předchozí rovnice, pro výpočet průtoku v profilu je nutné znát rychlost, která se stanoví podle Chézyho rovnice (4.5)^[2.1]:

$$v = C\sqrt{Ri} \quad (4.5)$$

Hydraulický poloměr se vypočítá z rovnice (4.6)^[2.1]:

$$R = \frac{A}{O} \quad (4.6)$$

Kde: O je omočený obvod. Jedná se o délku z obvodu průtočné plochy, kde je kapalina ve styku s pevnou stěnou.

Vztahy pro výpočet Chézyho rychlostního součinitele mají empirický charakter a liší se dle různých autorů. Jednou z používaných rovnic je rychlostní vztah Pavlovského (4.7)^[2.1]:

$$C = \frac{1}{n} R^y \quad (4.7)$$

$$y = 2,5\sqrt{n} - 0,13 - 0,75\sqrt{R}(\sqrt{n} - 0,1)$$

Kde: n je drsnostní součinitel, závislý na materiálu dna a břehů koryta.

Jednodušším výpočtem je rychlostní vztah Manningův (4.8)^[2.1]:

$$C = \frac{1}{n} R^{1/6} \quad (4.8)$$

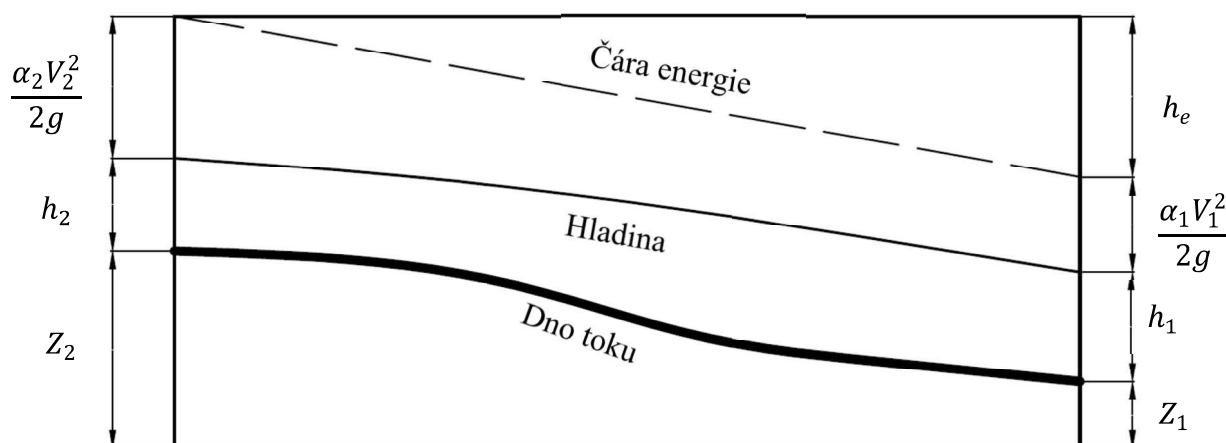
Ustálené nerovnoměrné proudění

Ustálené proudění předpokládá konstantní průtok $Q(x)$ bez časové závislosti, ale s různými rychlostmi a průtokovými průřezy v závislosti na poloze na toku. Nerovnoměrné proudění se všeobecně řeší za pomoci metody po úsecích, kde se celá řešená část rozdělí na malé úseky a ty se počítají postupně po či proti proudu (Po proudu u bystrinného proudění, proti u říčního).

Řešení probíhá iterativně, vždy mezi dvěma nejbližšími profily. Za tímto účelem používá program rovnici (4.9)^[2.2] vyjadřující zákon zachování mechanické energie pro skutečnou kapalinu^[2.1]:

$$Z_2 + h_2 + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} = Z_1 + h_1 + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} + h_e \quad (4.9)$$

Kde: Z_2, Z_1 jsou geodetické výšky dna toku profilu 2 a profilu 1, respektive výška dna toku nad srovnávací rovinou. h_2, h_1 jsou pak hloubky vody v obou profilech, v_2, v_1 jsou průměrné rychlosti v profilech uvažované jako podíl průtoku plochou, α_2, α_1 jsou Coriolisova čísla (velocity weighting coefficient), g je tíhové zrychlení a h_e je ztráta energetické výšky



Obrázek 4.1 Grafické znázornění členů rovnice (4.9)^[2.2]

Ztráta energetické výšky je složena ze ztrát způsobených třením a ze ztrát způsobených kontrakcemi a expanzemi. V programu probíhá její výpočet pomocí rovnice (4.10)^[2.2]:

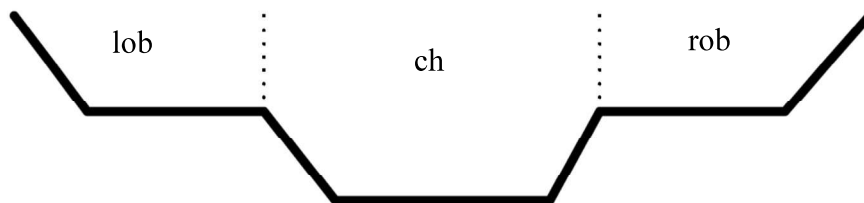
$$h_e = L\bar{S}_f + C \left| \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} - \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} \right| \quad (4.10)$$

Kde: L je délka řešeného úseku, \bar{S}_f je reprezentativní sklon čáry energie a C je koeficient kontrakce a expanze.

Délka úseku se počítá podle rovnice (4.11)^[2.2]:

$$L = \frac{L_{lob}\bar{Q}_{lob} + L_{ch}\bar{Q}_{ch} + L_{rob}\bar{Q}_{rob}}{\bar{Q}_{lob} + \bar{Q}_{ch} + \bar{Q}_{rob}} \quad (4.11)$$

Protože program uvažuje se složeným profilem, délka je vážený průměr délky úseku podle průtoku v jeho jednotlivých částech. L_{lob}, L_{ch}, L_{rob} jsou vzdálenosti mezi profily koryta pro jednotlivé části a $\bar{Q}_{lob}, \bar{Q}_{ch}, \bar{Q}_{rob}$ jsou aritmetické průměry průtoků v těchto částech. Nejjednodušší verze výpočtu uvažuje se třemi částmi koryta a to: levou bermou (left overbank – lob), kynetou (channel – ch) a pravou bermou (right overbank - rob) viz Obrázek 4.2.



Obrázek 4.2 Schéma složeného koryta

Pro každou z částí počítá program průtok zvlášť podle rovnice (4.12)^[2.2], vycházející z Chézyho rovnice (4.5):

$$Q = KS_f^{1/2} \quad (4.12)$$

Kde: K je modul průtoku, S_f je sklon čáry energie.

Dále:

$$K = \frac{1,486}{n} AR^{2/3} \quad (4.13)$$

Kde: A je plocha části koryta, R je hydraulický poloměr části vypočítaný jako podíl plochy části a omočeného obvodu části, n je Manningův součinitel drsnosti.

Dalším členem rovnice (4.10) je koeficient α (Coriolisovo číslo). V rovnici (4.14)^[2.2] je koeficient násobený rychlostní výškou z průměrné rychlosti v profilu roven váženému průměru rychlostních výšek průtokem v jednotlivých částech profilu.

$$\alpha \frac{\bar{V}^2}{2g} = \frac{\left[Q_1 \frac{V_1^2}{2g} + Q_2 \frac{V_2^2}{2g} + \dots + Q_N \frac{V_N^2}{2g} \right]}{Q_1 + Q_2 + \dots + Q_N} \quad (4.14)$$

Prakticky je koeficient počítán dle rovnice (4.15)^[2.2]:

$$\alpha = \frac{(A_t)^2 \left[\frac{K_{lob}^3}{A_{lob}^2} + \frac{K_{ch}^3}{A_{ch}^2} + \frac{K_{rob}^3}{A_{rob}^2} \right]}{K_t^3} \quad (4.15)$$

Kde: K_{lob} , K_{ch} , K_{rob} jsou moduly průtoků pro jednotlivé části a K_t je celkový modul průtoku, podobně A_{lob} , A_{ch} , A_{rob} jsou plochy jednotlivých částí a A_t je celková průtočná plocha.

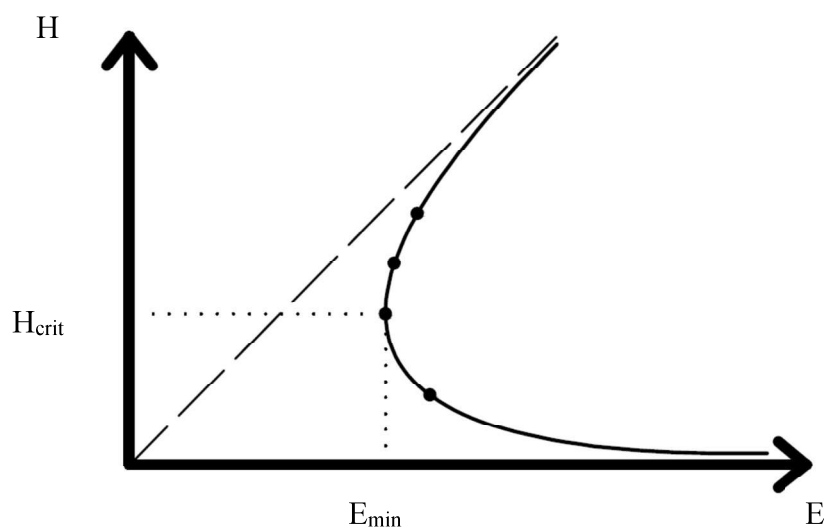
Výchozí rovnice pro výpočet reprezentativního sklonu čáry energie:

$$\bar{S}_f = \left(\frac{Q_1 + Q_2 + \dots + Q_N}{K_1 + K_2 + \dots + K_N} \right)^2 \quad (4.16)$$

Stanovení kritické hloubky je potřeba pro rozlišení říčního a bystřinného proudění. Pomocí rovnice (4.17)^[2.2] program určí hodnotu energetické výšky E a výpočet je opakován iterativně až do dosažení její minimální hodnoty E_{min} , které pak odpovídá kritická hloubka viz Obrázek 4.3.

$$E = H + \frac{\alpha V^2}{2g} \quad (4.17)$$

V případě, že hladina v profilu H je větší než hladina kritická H_{crit} , jedná se o říční proudění (supercritical), pokud je menší, jedná se o bystřinné proudění (subcritical).

Obrázek 4.3 Závislost hloubky na energetické výšce^[2,2]

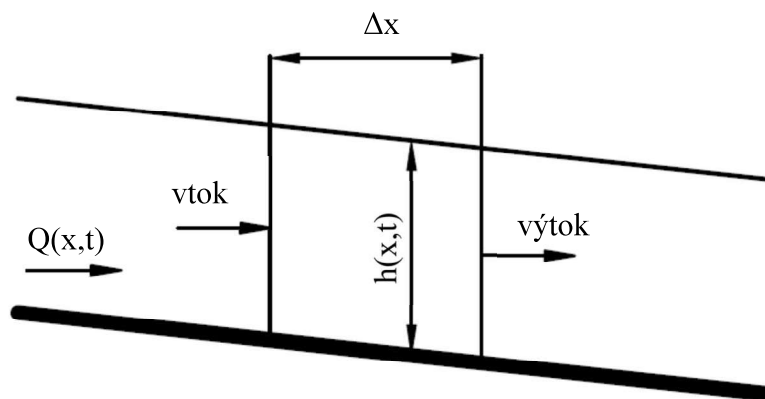
Dalším způsobem pro určení kritické hloubky je výpočet Froudova čísla podle rovnice (4.18)^[2,1]:

$$Fr^2 = \frac{\alpha V^2}{gh_s} = \frac{\alpha Q^2 B}{gA^3} \quad (4.18)$$

Kde: h_s je střední hloubka průřezu vypočtená jako podíl průtočné plochy A šířkou průřezu v hladině B . Froudovo kritérium při kritickém proudění má hodnotu 1. Při $Fr < 1$ se jedná o říční proudění, při $Fr > 1$ se jedná o bystřinné proudění.

Neustálené nerovnoměrné proudění

Druhým typem výpočtu, které lze v programu HEC-RAS provést, je neustálené nerovnoměrné proudění. Schéma řešení viz Obrázek 4.4.



Obrázek 4.4 Schéma pro řešení 1D proudu na výseku o délce Δx [2.2]

Dle zákona zachování hmotnosti pro výsek o malé délce Δx platí rovnice (4.19) [2.2]:

$$\rho \frac{\partial A_T}{\partial t} \Delta x = \rho \left[\left(Q - \frac{\partial Q}{\partial x} \frac{\Delta x}{2} \right) - \left(Q + \frac{\partial Q}{\partial x} \frac{\Delta x}{2} \right) + Q_1 \right] \quad (4.19)$$

Kde: $Q - \frac{\partial Q}{\partial x} \frac{\Delta x}{2}$ odpovídá množství (průtoku) na vtoku do výseku Δx , $Q + \frac{\partial Q}{\partial x} \frac{\Delta x}{2}$ odpovídá množství na výtoku z výseku, $\frac{\partial A_T}{\partial t} \Delta x$ je změna (akumulace) průtočného množství ve výseku, Q_1 je postranní přítok (odtok) do výseku a ρ je objemová hmotnost kapaliny.

Po zjednodušení platí rovnice (4.20) [2.2]:

$$\frac{\partial A_T}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} - q_1 = 0 \quad (4.20)$$

Kde: q_1 je specifický průtok po délce výseku Δx .

Zákon zachování hybnosti je vyjádřen druhým Newtonovým zákonem dle rovnice (4.21) [2.2]:

$$\sum F_x = \frac{d\vec{M}}{dt} \quad (4.21)$$

Kde: \vec{M} je hybnost.

V rovnici (4.21) je uvažováno na levé straně několik složek sil působících na výsek. Jako tlakové síly dle rovnice (4.22) [2.2]:

$$F_{ph} = -\rho g A \frac{\partial h}{\partial x} \Delta x \quad (4.22)$$

Další složkou je síla od tíhy kapaliny dle rovnice (4.23) [2.2]:

$$F_g = -\rho g A \frac{\partial Z}{\partial x} \Delta x \quad (4.23)$$

Kde: Z je nadmořská výška dna.

Třetí složkou je třecí síla dle rovnice (4.24)^[2.2]:

$$F_f = -\rho g A S_f \Delta x \quad (4.24)$$

Kde S_f je sklon čáry energie dle Manninga:

$$S_f = \frac{Q|Q|n^2}{2,208R^{4/3}A^2} \quad (4.25)$$

Výsledná rovnice pro zákon zachování hybnosti (4.26)^[2.2]:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial QV}{\partial x} + gA \left(\frac{\partial Z}{\partial x} + S_f \right) = 0 \quad (4.26)$$

4.1.2 2D proudění

Neustálené proudění mělké vody

Oproti 3D proudění vyjádřené Navier-Stokesovými rovnicemi (4.3) se pro tento typ výpočtu využívá zjednodušujícího předpokladu, kdy se zanedbává proudění ve směru osy z , jelikož rychlost proudění v tomto směru je značně menší v porovnání s rychlostmi ve směru osy x a osy y .

Stejně jako v předchozích případech vychází výpočet ze dvou fyzikálních zákonů. Prvním je zákon zachování hmotnosti dle rovnice (4.27)^[2.2]:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial hu_x}{\partial x} + \frac{\partial hu_y}{\partial y} + q = 0 \quad (4.27)$$

Kde:

$$H(x, y, t) = z(x, y) + h(x, y, t) \quad (4.28)$$

Kde: z je geodetická výška dna toku, h je hloubka vody, H je geodetická výška hladiny, u_x, u_y jsou rychlosti ve směru osy x a osy y , q je zdroj/odběr proudění.

Druhým je zákon zachování hybnosti dle rovnice (4.29)^[2.2]:

$$\begin{aligned}\frac{\partial u_x}{\partial t} + u_x \frac{\partial u_x}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_x}{\partial y} &= -g \frac{\partial H}{\partial x} + \nu_f \left(\frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial y^2} \right) - c_f u_x + f u_y \\ \frac{\partial u_y}{\partial t} + u_x \frac{\partial u_y}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_y}{\partial y} &= -g \frac{\partial H}{\partial y} + \nu_f \left(\frac{\partial^2 u_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial y^2} \right) - c_f u_y + f u_x\end{aligned}\quad (4.29)$$

Kde: c_f je koeficient tření ve dně, f je Coriolisův parametr a ν_f je koeficient horizontální turbulentní viskozity:

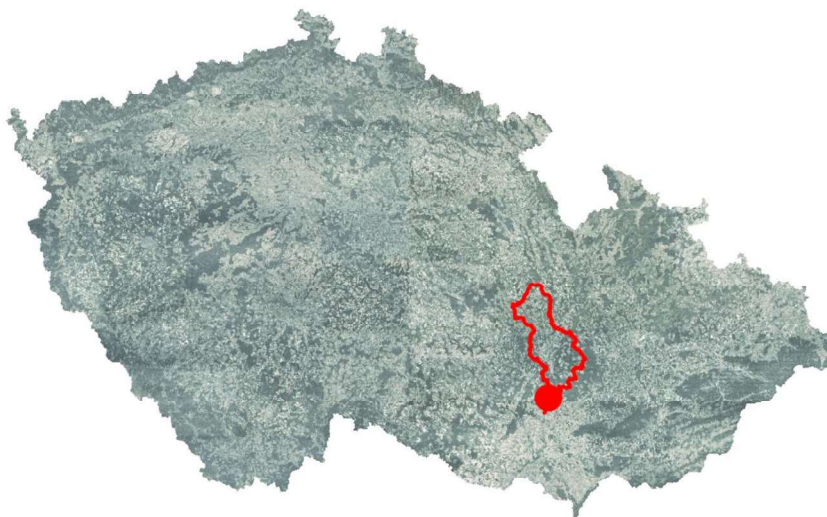
$$\nu_f = D h u_* \quad (4.30)$$

Kde: D je empirická konstanta a u_* smyková rychlost u dna.

Pro výpočet 2D proudění používá program HEC-RAS metoda konečných objemů, kde je oblast, ve které se takovéto proudění vyskytuje, rozdělena na výpočtovou síť (mesh).

5 ZÁJMOVÉ ÚZEMÍ

Zájmovým územím této práce je úsek na řece Svitavě v Brně km 8,085 – 10,950. Povodí Svitavy leží takřka ve středu východní poloviny České republiky na území Pardubického a Jihomoravského kraje. Poloha povodí Svitavy viz Obrázek 5.1. Brno je svou rozlohou i počtem obyvatel druhé největší město České republiky a je také největší město Moravy. Nachází se v Jihomoravském kraji, jehož je i sídlem, a dále je samostatným okresem Brno-město.



Obrázek 5.1 Povodí Svitavy v rámci ČR a lokalizace zájmového úseku

Svitava vtéká do Brna na jeho severovýchodě. Úsek prochází třemi městskými částmi: Obřany, Husovice a Maloměřice.



Obrázek 5.2 Zájmový úsek v rámci města Brna

Oblast je v minulosti známá svými rozlivy při vyšších průtocích. Pro lepší pochopení území je nutno zhodnotit z několika hledisek, jako fyzicko-geografické podmínky pro odtok povodně, klimatické poměry apod.^[2,7]

5.1 FYZICKO-GEOGRAFICKÉ PODMÍNKY

Svitava pramení v Českotřebovské vrchovině v nadmořské výšce 465 m n. m. po 97,3 km ústí do řeky Svratky jako levostranný přítok. Soutok obou řek leží na jihu Brna v nadmořské výšce 192 m n. m.

5.1.1 Reliéf

Charakter reliéfu je v oblasti pramene procházejícím Svitavskou pahorkatinou velmi úzký a silně rozčleněný. V oblasti Boskovické Brázdy lze pozorovat přechod ve střídání sníženin s vyšším terénem s plochým povrchem. Na středním toku prořezává Svitava členitou Adamovskou vrchovinu. Reliéf nemá pouze vliv na samotnou řeku Svitavu, ale i její přítoky, například levostranný přítok Punkva, procházející Moravským krasem se svými krasovými plošinami a hlubokými údolími, nebo pravostranné přítoky Křetínka, která vytváří hluboce zařezané údolí v Kunštátské vrchovině. Přehled geomorfologických jednotek, do kterých zasahuje řeka Svitava viz Tabulka 5.1.

Tabulka 5.1 Geomorfologické jednotky, kterými protéká řeka Svitava^[2,7]

Vzdálenost od pramene [km]	Geomorfologická jednotka		
	Celek	Podcelek	Okrsek
2,3	Svitavská pahorkatina	Českotřebovská vrchovina	Kozlovský hřbet
29,3			Ústecká brázda
41,5	Boskovická brázda	Malá Haná	Svárovská vrchovina
46,7			Letovická kotlina
52,5			Lysická sníženina
65,3			Krhovský hřbet
72,7	Drahanská vrchovina	Adamovská vrchovina	Blanenský prolom
76,5			Soběšická vrchovina/Výškůvka
84,5			Soběšická vrchovina/Ochozské plošiny
85,3			Řícmanicko-kanický prolom
87,3			Obřanská kotlina
97,3	Dyjsko-svratecký úval	Dyjsko-svratecká niva	

Povodí Svitavy probíhá téměř svisle od severu směrem na jih. Tvar povodí je úzký a protáhlý a dosahuje maximální šířky 26 km oproti své délce 70 km. Stavba říční sítě má pérovitý tvar, třebaže na severu se svým pravostranným přítokem Křetínkou tvoří takřka paralely. Takovýto tvar povodí má vliv na průběh povodňové vlny. Protože srážky na přítocích překonávají různé vzdálenosti, nedochází k souběhu povodňových vln v ústí do takové míry jako u více kruhového tvaru povodí. Kulminační průtoky proto bývají nižší, ale rozložené přes delší časový úsek.

5.1.2 Geologie a hydrogeologie

V povodí Svitavy se nachází několik hydrogeologických rajonů viz Tabulka 5.2. Nejprve je to na soutoku se Svitavou Dyjsko-svratecký úval, který se systematicky řadí pod Neogenní sedimenty vněkarpatských a vnitrokarpatských pánví - 22, které spadají pod rajony v terciérních a křídových sedimentech pánví - 2. V této oblasti převažují nezpevněné mořské sedimenty, na kterých spočívají většinou horniny fluvialního a eolického původu.

Dalším je Ústecká synklinála povodí Svitavy, patřící do Východočeské křídý - 42 - rajonu v sedimentech svrchní křídý - 4. V této části převažují křídové sedimenty na povrchu překryté kvartérními sedimenty.

Boskovická brázda – severní část, řazený pod permokarbon limnických brázd – 52 - rajonu v sedimentech permokarbonu - 5. V oblasti jsou vysoké mocnosti permokarbonských sedimentů. Místy lze také nalézt uložení křídového, neogenního a kvartérního stáří.

V povodí se nachází celkem tři rajony v horninách krystalinika, proterozoika a paleozoika - 6. Krystalinikum brněnské jednotky, spadající pod krystalinikum Českomoravské vrchoviny - 65, obsahuje převážně vyvřelé horniny. Dále pod Sedimenty moravskoslezského devonu a spodního karbonu – 66 – patří Kulm drahanské vrchoviny, kde nejvíce zastoupenou horninou jsou droby, a Moravský kras tvořený hlavně vápencovými sedimenty.

Tabulka 5.2 Hydrogeologické rajony, přes které prochází povodí Svitavy^[2,7]

Hydrogeologické rajony	
4232	Ústecká synklinála v povodí Svitavy
5221	Boskovická brázda – severní část
6620	Kulm Drahanské vrchoviny
6630	Moravský kras
6570	Krystalinikum brněnské jednotky
2241	Dyjsko-svratecký úval

5.2 KLIMATICKÉ POMĚRY

Teplota

Teplotní poměry Svitavy se liší podél svého toku. Na soutoku se Svratkou se pohybuje průměrná roční teplota kolem 9 °C. Směrem k severu v horní části povodí se průměrné teploty pohybují mezi 6–7 °C. Častý inverzní charakter počasí může způsobovat delší období se sněhovou pokrývkou a následně měnit začátek a intenzitu jejího tání. Porovnání územních teplot v roce 2015 pro Pardubický a Jihomoravský kraj, kterými Svitava prochází, s celorepublikovým průměrem viz Tabulka 5.3.

Tabulka 5.3 Průměrné měsíční teploty pro Pardubický a Jihomoravský kraj v roce 2015^[3,1]

Územní teploty v roce 2015														
Kraj		Měsíc												Rok
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Česká republika	T	0,9	-0,1	4,0	7,8	12,4	16,1	20,2	21,3	13,1	7,9	5,8	3,7	9,4
	N	-2,8	-1,1	2,5	7,3	12,3	15,5	16,9	16,4	12,8	8,0	2,7	-1,0	7,5
	O	3,7	1,0	1,5	0,5	0,1	0,6	3,3	4,9	0,3	-0,1	3,1	4,7	1,9
Pardubický	T	0,9	0,1	4,0	7,8	12,3	16,1	20,3	21,6	13,3	8,0	5,6	3,6	9,5
	N	-3,1	-1,4	2,2	7,1	12,2	15,3	16,6	16,3	12,7	8,0	2,5	-1,3	7,2
	O	4,0	1,5	1,8	0,7	0,1	0,8	3,7	5,3	0,6	0,0	3,1	4,9	2,3
Jihomoravský	T	1,4	1,0	4,9	9,3	13,8	18,1	22,0	22,6	14,9	8,8	6,1	2,7	10,5
	N	-2,6	-0,6	3,4	8,6	13,5	16,6	18,1	17,6	13,9	8,8	3,3	-0,7	8,3
	O	4,0	1,6	1,5	0,7	0,3	1,5	3,9	5,0	1,0	0,0	2,8	3,4	2,2

T = teplota vzduchu [°C], N = dlouhodobý normál teploty vzduchu 1961-1990 [°C], O = odchylka od normálu [°C]

Srážky

Úhrn srážek velmi úzce souvisí s nadmořskou výškou. Průměrné roční úhrny se pohybují od hodnot kolem 500 mm v oblasti Brna až k 750 mm v severozápadní části povodí v oblasti Českomoravské vrchoviny. Typicky se maximální úhrny vyskytují v měsíci červnu a druhotně v listopadu, minimální úhrny srážek lze pozorovat zejména v únoru či lednu. Porovnání územních srážek v roce 2015 pro Pardubický a Jihomoravský kraj, kterými Svitava prochází, s celorepublikovým průměrem viz Tabulka 5.4.

Tabulka 5.4 Průměrný měsíční úhrn srážek pro Pardubický a Jihomoravský kraj v roce 2015^[3,2]

Územní srážky v roce 2015														
Kraj		Měsíc												Rok
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Česká republika	S	53	12	48	30	49	58	36	67	32	52	74	20	532
	N	42	38	40	47	74	84	79	78	52	42	49	48	674
	%	126	32	120	64	66	69	46	86	62	124	151	42	79

Pardubický	S	56	10	54	20	47	47	37	88	25	44	87	22	536
	N	47	40	42	46	77	87	82	84	56	45	52	54	711
	%	119	25	129	43	61	54	45	105	45	98	167	41	75
Jihomoravský	S	34	12	36	16	41	32	35	92	31	49	36	16	430
	N	30	30	29	38	65	75	64	61	41	34	42	33	543
	%	113	40	124	42	63	43	55	151	76	144	86	48	79

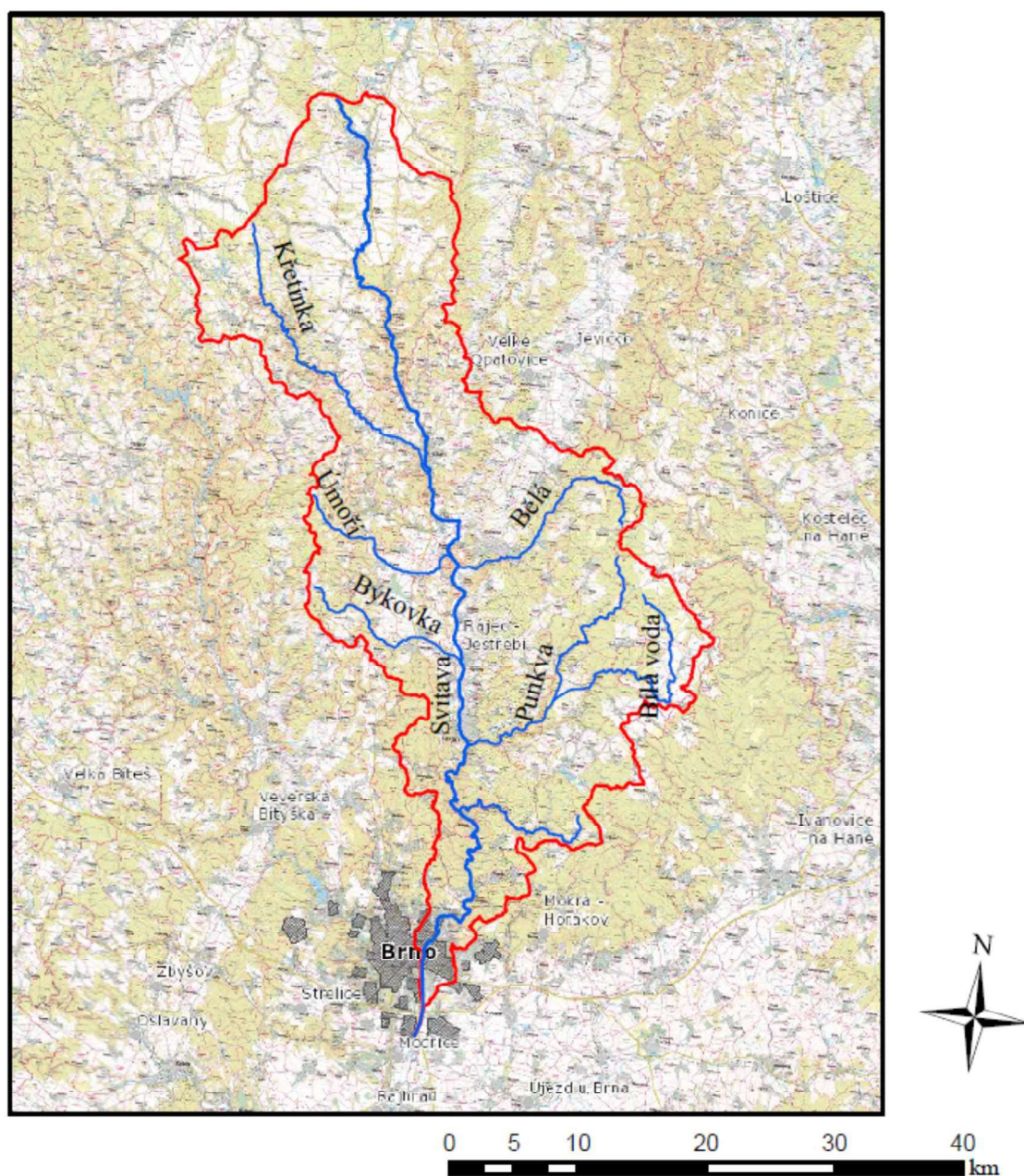
S = úhrn srážek [mm], N = dlouhodobý srážkový normál 1961-1990 [mm]. % = úhrn srážek v % normálu 1961–1990

5.3 HYDROLOGICKÉ CHARAKTERISTIKY ÚZEMÍ

Tok řeky Svitavy je tok dlouhý 98,39 km, pramen se nachází v Svitavské pahorkatině severozápadně od Svitav u vrcholu Javorník (471,93 m n. m.) a na jihu města Brna se pak Svitava vlévá jako levostranný přítok do řeky Svatky (km 40,550). Obě řeky patří do povodí Dunaje, tedy do rozvodí Černého moře, a severní okraj povodí Svitavy je zároveň částí hranice hlavního evropského rozvodí Severního a Černého moře. Systematické zařazení je následující^[3,3]:

- Rozvodnice 1. řádu: povodí Dunaje: 4.
- Rozvodnice 2. řádu: Svatka po Jihlavu: 4-15.
- Rozvodnice 3. řádu, název: Svitava 4-15-02 (Plocha povodí 1155,42 km²).

Po své délce Svitava protéká dvěma kraji. Pardubickým, kde zasahuje do okresu Svitavy, a Jihomoravským, kde postupně zasahuje okresy Blansko, Brno-město a Brno-venkov.



Obrázek 5.3 Svitava a její přítoky

Podzemní vody

V městě Brně lze zdroje podzemní vody nalézt ve dvou rozdílných geologických formacích^[2,5]. První jsou kvartérní říční naplaveniny, ve kterých se nachází mělké podzemní vody, které lze využívat pro technické účely. Druhými jsou hluboké artéské zvodně v neogenních sedimentech.

5.3.1 Monitorování na toku

Pro sledování množství vod protékajících Svitavou jsou současně využívány čtyři měrné profily: Bílovice nad Svitavou, Letovice, Rozhraní a Hradec nad Svitavou. Údaje o profilech viz Tabulka 5.5.

Tabulka 5.5 Profily pro sledování měsíčního množství vod^[3,3]

Sledování vodního Stavu na řece Svitavě				
Název stanice	Hradec nad Svitavou	Rozhraní	Letovice	Bílovice nad Svitavou
Identifikátor	450500	452000	454000	457000
Plocha povodí [km²]	55,2	227,1	423,78	1119,98
Nadmořská výška nuly vodočtu [m n. m.]	421,23	354,15	320,29	217,88
Číslo hydrologického pořadí	4-15-02-0030-0-00-80	4-15-02-0130-0-00-40	4-15-02-0350-0-00-30	4-15-02-1093-0-00-30
Pobočka ČHMÚ	Brno	Brno	Brno	Brno
Počátek pozorování	1982	1925	1925	1917

Na toku je dále sledována povodňová situace. Pro tyto účely jsou veřejně k dispozici údaje v celkem třech profilech: Bílovice nad Svitavou, Rozhraní a Letovice. Český hydrometeorologický úřad poskytuje služby výstrahy povodňového nebezpečí, kde jsou sledovány překročené limity pro Stupně povodňové aktivity viz Tabulka 5.6.

Tabulka 5.6. Hlásné profily povodňové služby pro řeku Svitavu^[3,4]

Limity pro SPA [cm]					
č.	Název stanice	Kat.	SPA		
			I.	II.	III.
376	Rozhraní	B	90,0	120,0	150,0
378	Letovice	A	100,0	130,0	170,0
380	Bílovice nad Svitavou	A	200,0	270,0	350,0

Ve zmíněných profilech jsou dále známé N-leté průtoky, které jsou nezbytné za účelem vyšetření povodňové situace na vybraném úseku. Údaje o průtocích, které jsou k dispozici na stránkách ČHMÚ, viz Tabulka 5.7, jsou jen velmi nepatrně rozdílné od údajů dle Povodňového plánu města Brna, viz Tabulka 5.8, a údajů z podkladových materiálů [A.1], viz Tabulka 5.9.

Tabulka 5.7 N-leté průtoky v hlásných profilech^[3,4]

		$Q_N [m^3 \cdot s^{-1}]$				
č.	Název stanice	Q_1	Q_5	Q_{10}	Q_{50}	Q_{100}
376	Rozhraní	6,4	17,5	24,0	43,0	54,0
378	Letovice	14,5	34,4	45,7	78,1	95,0
380	Bílovice nad Svitavou	37,0	78,0	99,0	153,0	179,0

Povodňový plán města Brna s poslední aktualizací v květnu 2015 poskytuje údaje o průtocích ve dvou profilech.

Tabulka 5.8 N-leté průtoky dle povodňového plánu města Brna^[2,5]

Profil	$Q_N [m^3 \cdot s^{-1}]$						
	Q_1	Q_2	Q_5	Q_{10}	Q_{20}	Q_{50}	Q_{100}
Svitava Bílovice	39,0	55,0	79,0	99,0	120,0	150,0	175,0
Svitava nad soutokem se Svratkou	40,0	55,5	86,0	106,0	127,0	157,0	181,0

Údaje z podkladové studie pochází z roku 2007. I když to ve studii není přesně uvedeno, průtoky nejbližší odpovídají profilu na soutokem se Svitavou viz Tabulka 5.8.

Tabulka 5.9 N-leté průtoky dle podkladových materiálů[A.1]^[1,1]

$Q_N [m^3 \cdot s^{-1}]$						
Q_1	Q_2	Q_5	Q_{10}	Q_{20}	Q_{50}	Q_{100}
40,0	56,5	83,0	101,0	123,0	154,0	180,0

5.3.2 Významná vodní díla

Vodní díla mají významný vliv na hydrologický režim. Pro řeku Svitavu se jedná zejména o vodní nádrž Letovice, která se nachází na Křetínce, pravostranném přítoku, a rovněž nádrž Boskovice ležící na Bělé, levostranném přítoku^[3,5].

- Letovice – jedná se o zemní sypanou hráz o výšce 28,5 m. Důvodem k výstavbě hráze bylo nalepšování průtoků v řece Svitavě a trvalé udržování minimálního průtoků. Dále je dílo využíváno pro rekreaci, rybářství a výrobu elektrické energie. Nádrž nemá ochrannou funkci.
- Boskovice – je sypaná kamenitá hráz o výšce 42,5 m. Dílo byla postaveno za účelem zásobování pitnou vodou blanenské oblasti. Dalším využitím díla je nalepšení průtoků v říčce Bělé, výroba elektrické energie a převádění povodňových průtoků.

5.4 CHARAKTER ÚSEKU

Práce se zabývá částí řeky Svitavy v Brně mezi kilometry 8,085 a 10,950. Úsek zasahuje do městských částí: Obrány, Maloměřice a Husovice. Čísla hydrologických pořadí vybraného území jsou následující^[3.3]:

- 4-15-02-1096-0-10,
- 4-15-02-1094-0-00,
- 4-15-02-1095-0-00,
- 4-15-02-1093-0-00.

Úsek se nachází v intravilánu města a z větší části se jedná o upravené koryto^[2.4]. Zejména z důvodu ochrany před povodňovým nebezpečím a výstavbou nové železnice došlo v polovině 19. století k výraznému napřímení toku, který dříve probíhal ve velkých zákrutech. Zároveň byl posunut soutok se Svratkou (v minulosti nad dnešním Komárovem) až na jih města.

Dle údajů z Povodňového plánu města Brna^[2.5] je tvar koryta převážně lichoběžníkový se strmými svahy o sklonu 1:1,5. Opevnění je realizováno dlažbou opřenu o kamennou patku nebo kamenným pohozem, avšak tyto úpravy většinou pochází z první poloviny 20. století. Svahy jsou také v některých částech osety, ohumusovány a jejich údržba probíhá pravidelným sečením. Ukázka tvaru koryta viz Obrázek 5.4



Obrázek 5.4 Ukázka koryta km 8,085 (duben 2013)

Rozdílné od zbytku úseku jsou jezové zdrže, zejména jezu Maloměřice a jezu Obrány. Břehy nevykazují charakter upraveného toku, a také zde lze pozorovat mnohem vyšší výskyt stromů a keřů viz Obrázek 5.5.



Obrázek 5.5 Ukázka jezové zdrže nad jezem Maloměřice km 8,833 (duben 2013)^[2,6]

5.5 OBJEKTY NA TOKU

V zájmovém úseku se nachází několik důležitých objektů, které je nutno zahrnout do modelu koryta, jelikož mohou mít zásadní vliv na výpočet průběhu hladiny. Patří mezi ně jezová tělesa, mosty a lávky viz Tabulka 5.10.

Tabulka 5.10 Seznam objektů nacházejících se na úseku od km 8,085 - 10,950^[1,2]

Objekt	km	Poznámky
Ocelová lávka	8,085	
"Husovický most"	8,310	Neovlivňuje průtok
Zaústění náhonu	8,327	
Lávka	8,504	Lávka s potrubím
"Maloměřický most"	8,692	Technická památka
Jez Maloměřice	8,833	
Odbočení náhonu	8,835	
Zaústění náhonu	9,238	
Jez Maloměřice II	9,620	
Jez Cacovice	10,157	
Odbočení náhonu	10,160	
Obřanský potok	10,655	
Zaústění náhonu	10,721	
"Obřanský most"	10,775	
Jez Obřany	10,950	
"Železniční most Obřany"	11,002	Neovlivňuje průtok

V následujícím textu je uveden stručný popis a fotografie vybraných objektů.

5.5.1 Jezy

Informace o jezových konstrukcích byly dostupné z Povodňového plánu města Brna^[2,5].

Jez Maloměřice km 8,833

Jez Maloměřice - Obrázek 5.6 - byl postaven roku 1861. Jedná se o betonovou konstrukci, která je opatřena kovovými klapkami o výšce 0,5 m. Jez patří do soukromého vlastnictví a dle manipulačního řádu má vlastník povinnost při povodňovém ohrožení klapky vyhradit. Nevyhrazené klapky způsobují zaplavení okolí.



Obrázek 5.6 Jez Maloměřice km 8,833 (duben 2013)^[2,6]

Jez Maloměřice II km 9,620

Jez Maloměřice II - Obrázek 5.7 - leží na km 9,620. Jedná se o prefabrikovanou betonovou konstrukci s přelivnou hranou o délce 18 m. Jez spadá do vlastnictví povodí Moravy, s.p.



Obrázek 5.7 Jez Maloměřice II km 9,620 (duben 2013)^[2,6]

Jez Cacovice km 10,157

Jez Cacovice - Obrázek 5.8 – leží na km 10,157 a pochází z roku 1910. Jedná se o betonovou konstrukci s proudnicovou přelivnou plochou vysokou 3,2 m a délkou přelivné hrany 42,8 m. Jez je ve vlastnictví Povodí Moravy, s.p.



Obrázek 5.8 Jez Cacovice km 10,157 (duben 2013)^[2,6]

Jez Obřany km 10,962

Jez Obřany - Obrázek 5.9 - je další objekt v soukromém vlastnictví. Leží na km 10,962. Je to betonová konstrukce s proudnicovou přelivnou plochou. Přelivná hrana je opálena dřevěnými nástavkami vysokými 1,0 m. Stejně jako u jezu Maloměřice má vlastník povinnost nástavky při povodňovém ohrožení vyhradit, jelikož jejich nevyhrazení má z následků zaplavení blízkého okolí.



Obrázek 5.9 Jez Obřany pohled 2 km 10,962 (duben 2013)^[2,6]

5.5.2 Mosty a lávky

Informace o mostních konstrukcích byly dostupné zejména z online encyklopedie mostů autora Josefa Dušana^[3,6].

„Husovický most“ km 8,310

Silniční most pocházející z roku 1984, přes který prochází ulice Provazníková vedoucí na Tomkovo náměstí, je 23 m široký a 94 m dlouhý. Most je zvláštní svými atypickými pilíři ve tvaru písmene „V“ viz Obrázek 5.10.



Obrázek 5.10 "Husovický most" km 8,310 (duben 2013)

„Maloměřický most“ km 8,692

Most viz Obrázek 5.11 pochází z roku 1928, kdy byl otevřen k 10. výročí vzniku Československa. Jedná se o železobetonovou konstrukci tvořenou třemi souběžnými 33 m dlouhými oblouky a pohyblivými klouby, které překlenují řeku Svitavu. Most, který byl prohlášen za technickou památku, stále slouží pro silniční a tramvajovou dopravu.



Obrázek 5.11 "Maloměřický most" km 8,692 (duben 2013)

„Obřanský most“ km 10,775

Jedná se železobetonovou konstrukci soužící pro převod silniční komunikace.



Obrázek 5.12 "Obřanský most" km 10,775^[4,3]

„Železniční most Obřany“ km 11,002

Most pocházející z roku 1953 je konstruován z kamene. Tvoří ho dva oblouky, jeden překlenující řeku Svitavu, druhý přilehlou pozemní komunikaci. Celková délka mostu činí 140 m, šířka 11 m a oblouky mají vzepětí 8,3 m. Most kříží řeku Svitavu pod úhlem 90 stupňů.



Obrázek 5.13. "Železniční most Obřany" km 11,002 (duben 2013)^[2,6]

5.6 HISTORIE POVODNÍ NA SVITAVĚ

Ve městě Brně je známo, že dochází k častým rozlivům obou místních řek, Svratky i Svitavy. Tato tematika je podrobně zpracována kolektivem autorů v knize Povodně v Brně^[2.7]. Záznamy a takovýchto událostech lze pozorovat už v dávné minulosti od přelomu 16. a 17. století v dobových kronikách a jiných písemnostech. Různé prameny hovoří o tom, že v minulosti způsobovaly neregulované toky Svratky a Svitavy téměř každoroční škody na majetku. Až do roku 1888 však neprobíhala žádná systematická pozorování, kdy na Svitavě začalo odečítání vodních stavů ve stanici Brno-Černovice. Od roku 1912 se vyčíslování průtoků přesunulo do Stanice Bílovice nad Svitavou. Další významnou stanicí na řece Svitavě byla od roku 1895 do roku 1904 ve stanici Brno-Olomoucká. Následující text uvádí stručný přehled povodňových událostí na řece Svitavě^[2.7].

5.6.1 Příklady významných povodní na řece Svitavě

Březen 1895

Ke konci měsíce března roku 1895 došlo ke dosažení povodňových stavů na obou řekách, ve stanici Brno-Černovice byla zaznamenána kulminační hladina 390 cm. Povodeň byla zapříčiněna táním sněhové pokrývky za doprovodu srážek. Dle záznamů došlo na Svitavě k rozlivu na polích mezi Husovicemi a Zábrdovicemi, v Obřanech byl zatopen mlýn a byla podemleta pobřežní hráz u jezu Radlas.

Duben 1900

Obdobně na začátku měsíce dubna 1900 došlo vlivem tání sněhové pokrývky a vydatnějšími srážkami ke kulminaci hladin obou řek. Zaznamenány byly hladiny ve stanici Brno-Olomoucká 320 cm a Brno-Černovice 440 cm. Zatopena byla krajina od Obřan až po Židenice, zejména v Husovicích byly zaplaveny níže položené domky a zahrady. Způsobeny byly především škody na osetých polích.

Prosinec 1902

Po mrazech ze začátku měsíce přišla ke konci prosince 1902 náhlá obleva. Ta zapříčinila odtávání sněhové pokrývky, ale především rozlámání a uvolnění ledu, které měly za následek tvorbu ledových bariér a doprovázenou nárůstem hladiny za nimi. Ve stanici Brno-Olomoucká byla zaznamenána hladina 210 cm a Brno-Černovice 300 cm. Pohyb ledu měl na Svitavě za následek poškození lávek, mlýnů a břehů. Další škody způsobilo zachycování ledových ker na

pozemcích, zejména mezi Židenicemi až po Husovice a Maloměřice. Výrazný úhyn ryb a příval znečištěné vody z polí měl také za následek kontaminaci pitné vody.

Únor 1909

Podobný charakter měla povodeň začátkem února 1909. Ledové kry způsobily rozliv vody zejména mezi Bílovicemi nad Svitavou a Obrány. Ve stanici Brno-Černovice byla zaznamenána kulminační hladina 442 cm. Opět došlo ke značnému úhynu ryb a v Husovicích byla stržena lávka.

Podobné záznamy o povodních způsobené náhlým táním sněhové pokrývky a jinými jevy spojenými s rychlým oteplením pokračují v následujících letech, například povodeň v březnu 1915 s kulminačním vodním stavem v Bílovicích nad Svitavou 347 cm, duben 1917 326 cm první povodňové vlny a 367 cm druhé povodňové vlny. V lednu 1920 byla zaznamenána povodeň s kulminačním průtokem $80 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ odpovídající Q_5 , v lednu 1922 povodeň $Q_1 - 48,3 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, v únoru 1922 povodeň $Q_2 - 60 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

Červen 1926

Po dlouhodobějších soustavných deštích z předchozích dnů, které měly za následek nasycenost půdy v území, došlo kolem 15. června k vzrůstu úhrnu srážek až na hodnoty API_{30} k 120 mm. Ve stanici Bílovice nad Svitavou bylo dosaženo kulminačního průtoku $100 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ odpovídajícímu Q_{10} .

V následujících letech se vyskytlo několik dalších událostí. V říjnu 1930 byla zaznamenána povodeň Q_5 s kulminačním průtokem $73 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, V lednu 1932 povodeň $Q_1 - 47 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ a v březnu 1937 byly pozorovány dvě povodňové vlny, první $Q_{10} - 112 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ a druhá $Q_5 - 83,3 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

Srpen-září 1938

Povodeň z přelomu srpna a září 1938 byla zapříčiněna dlouhým obdobím srážek, které vyvrcholily mezi 25. a 26. srpnem hodnotou API_{30} 200 mm. Jedná se jednu z nejvýznamnějších povodňových událostí 20. století v České republice. Průběh byl ve dvou kulminačních vlnách, první Q_{10} o průtoku $107 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ a druhá Q_{100} o průtoku $170 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Povodeň způsobila značné finanční škody a na řece Svratce došlo i k ztrátám na životech.

Až do současnosti lze pozorovat mnoho dalších případů povodní o menší či větší intenzitě. Už tři roky po události z roku 1938 nastala v březnu 1941 povodeň Q_{50} s kulminačním průtokem

$156 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Dále následovala v únoru 1946 povodeň $Q_2 - 52,6 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, v březnu 1946 $Q_1 - 49,8 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, v březnu 1947 $Q_5 - 78,0 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, v prosinci 1954 $Q_1 - 44,2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, v březnu 1955 $Q_1 - 46,8 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, v květnu 1962 $Q_{20} - 119 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, v březnu 1981 $Q_1 - 44,8 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, v květnu 1985 $Q_2 - 59,8 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, v červenci 1997 $Q_{20} - 125$ a $Q_1 - 48,8 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

Březen-duben 2006

Jedna z posledních zaznamenaných událostí je povodeň z jara roku 2006. Způsobena byla táním silné sněhové pokrývky za doprovodu deště. Kulminační průtok $112 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ zaznamenaný ve stanici Bílovice nad Svitavou ze dne 30. března odpovídal intenzitě povodně Q_{10} . Kromě jiných bylo zaplaveno patnáct domů a stavba aquaparku v Blansku a kvůli zaplaveným parovodům byl zastaven přívod tepla pro Adamov.

6 HYDRAULICKÉ VÝPOČTY

Cílem práce bylo vytvoření map rozlivů, hloubek a rychlostí pro vybraný úsek řeky Svitavy v Brně a následně ideový návrh protipovodňových opatření v místech rozlivů. Za tímto účelem byl ve výpočtové části řešení vytvořen model úseku v programu HEC-RAS a provedena simulace proudění povrchové vody při průtocích Q_5 , Q_{20} a Q_{100} . Následující text popisuje použitý software, postupu řešení a dostupná vstupní data. Pozdější kapitoly se budou zvlášť věnovat jednotlivým krokům při zpracování hydraulických výpočtů.

6.1 POUŽITÝ SOFTWARE

AutoCAD 2015

Program společnosti Autodesk AutoCAD 2015, je software pro zejména vytváření inženýrské výkresové dokumentace. V diplomové práci byl tento program využit pro prohlížení zdrojových materiálů [A.1], [A.2] a tvorbu příloh.

Microsoft Excel

Microsoft Excel je jedním z balíků aplikací Microsoft Office 2016 společnosti Microsoft Corporation. Jedná se o tabulkový procesor umožňující uživateli vykonávat soubor matematických, logických a jiných funkcí. V práci byl program především využit pro tvorbu vstupního souboru do programu HEC-RAS, výpočet výšky laterálních struktur a dalších drobnějších matematických operací.

ArcGIS for Desktop

ArcGIS je soubor navzájem propojených aplikací, jako ArcView, ArcEditor a ArcInfo. Je to nástroj pro zpracovávání a tvorbu geografických dat společnosti Esri. V diplomové práci byl program využit pro získání správných geodetických souřadnic toku a objektů na toku. Dále byly pomocí programu vytvořeny rastry využití území a rast rozlivů požadovaných Q_N a tvorbu příloh.

HEC-RAS 5.0.3

Je program pro modelování proudění v přirozeně tvarovaném toku vyvinut pod Ministerstvem obrany Spojených států amerických, US Army Corps of Engineers, který je volně dostupný veřejnosti. V programu byla vytvořena stěžejní část práce, model vybraného úseku. Na hotovém modelu byly provedeny simulace pro jednotlivé průtoky Q_N a byla vyšetřena kapacita koryta.

6.2 POSTUP ZPRACOVÁNÍ

Práce byla zpracována v následujících krocích:

1. Úprava vstupních dat – převedení geodeticky zaměřených dat do textového souboru ve formátu *.csv.
2. Úprava vstupních dat – úprava digitálního modelu reliéfu do rastrového formátu *.tif.
3. Vytvoření modelu v programu HEC-RAS.
4. Zpracování výsledků a tvorba map rozlivů, hloubek a rychlostí.

Popis vstupních dat

Pro vybranou část toku bylo rozhodnuto o vytvoření kombinace 1D a 2D modelu v programu HEC-RAS, 1D část modelu pro tvar koryta a 2D část pro inundační území.

Jako podklad pro vytvoření 1D části modelu byly využity zaměřené příčné profily [A.2], které byly ve formátu *.dxf. Poskytnuté materiály zahrnovaly i situaci příčných profilů, ale situaci chyběla osa a také georeference. Za účelem správného horizontálního umístění modelu byl použit podklad [A.3] ve formátu *.shp, který obsahoval trasovanou osu a bodové umístění některých zaměřených profilů.

Pro vytvoření 2D části modelu byl využit Digitální model reliéfu České republiky 5. generace [A.4].

6.2.1 Převedení dat do textového souboru

Do programu HEC-RAS lze vkládat informace o geometrii toku v různých formátech, pro tento model byl zvolen formát textového souboru *.csv, který v sobě nese informaci o prostorovém umístění všech bodů příčných profilů, tj. jejich horizontální souřadnice ve zvoleném souřadnicovém systému a nadmořskou výšku ve zvoleném výškovém systému. V rámci práce byly použity tyto souřadnicové a výškové systémy:

- Použitý souřadný systém při zpracování práce je Systém jednotné trigonometrické sítě katastrální (S-JTSK).
- Použitý výškový systém v práci je systém Baltský po vyrovnání (Bpv).

Prvním krokem bylo převedení informací o příčných profilech dle podkladu [A.2] do textového formátu. Profily byly v programu Microsoft Excel postupně seřazeny dle staničení na toku. Pro model byly použity profily od PF 104 km 8,080 po PF 202 km 11,0434.

Jednotlivé příčné profily se značně lišily v umístění počátku staničení, některé měly počátek umístěn na krajní levý bod, některé ve středu dna koryta, popřípadě v levém okraji dna koryta. Z důvodu budoucího přiřazení horizontálních souřadnic jednotlivým bodům, bylo nutné tento počátek posunout tak, aby se co nepřesněji blížil předpokládané ose. Úprava proběhla přepočtem staničení na profilu v programu Excel.

Pro získání správné georeference byla využity vrstvy se staničenou osou. Na ose byly bodově vyznačeny pouze některé příčné profily ve formátu *.shp. Pro profily zahrnuté v těchto vrstvách bylo v programu ArcGIS možné přímo získat souřadnice X a Y v S-JTSK průniku dna příčného profilu a osy toku. Pro zbylé profily byly tyto průniky umístěny na osu dle jejich staničení na toku Svitavy. Průnik osy toku a příčného profilu má v rámci příčného profilu staničení „0“. V některých případech však kilometráž na toku neodpovídala skutečným vzdálenostem zaměřených profilů a jednalo se o rozdíly až v desítkách metrů. Z tohoto důvodu bylo nutné porovnat umístění těchto profilů a objektů na toku s ortofoto mapou prohlížečské služby WMS. Po získání všech potřebných souřadnic průníků dna s osou toku byla atributová tabulka vyexportována do programu Excel pro další zpracování.

Po získání souřadnic X a Y v S-JTSK jednotlivých průníků dna s osou toku na každém příčném profilu, bylo nutno dopočítat souřadnice X a Y v S-JTSK zbylých bodů. Za tímto účelem bylo využito prostých trigonometrických funkcí s využitím vzdálenosti od počátku staničení na příčném profilu a úhlu, který svírá s horizontální osou X. Přepočtené souřadnice X a Y jednotlivých příčných profilů byly upraveny programem Excel do textové formátu umožňujícímu načtení do programu HEC-RAS. Textový soubor obsahuje celkem šest sloupců pro každý bod: název toku, číslo větve toku, staničení na toku, horizontální souřadnice na ose X a na ose Y a nadmořskou výšku. Ukázka souboru *.csv viz Obrázek 6.1.

RIVER_NAME	RIVER_REACH	RIVER_STATION	X	Y	Z
Svitava	1	8.140	-595 747.309362	-1 159 211.869602	205.42
Svitava	1	8.140	-595 749.688811	-1 159 210.042522	205.35
Svitava	1	8.140	-595 753.099354	-1 159 207.423707	203.00
Svitava	1	8.140	-595 754.209764	-1 159 206.571069	202.48
Svitava	1	8.140	-595 763.965505	-1 159 199.080040	202.48
Svitava	1	8.140	-595 771.897002	-1 159 192.989772	202.48
Svitava	1	8.140	-595 776.576585	-1 159 189.396515	204.09
Svitava	1	8.140	-595 778.797404	-1 159 187.691240	205.48
Svitava	1	8.140	-595 780.304388	-1 159 186.534089	205.44
Svitava	1	8.175	-595 724.900573	-1 159 183.687728	205.49
Svitava	1	8.175	-595 727.129324	-1 159 181.976363	205.39
Svitava	1	8.175	-595 729.342212	-1 159 180.277178	204.05

Obrázek 6.1 Ukázka souboru exportovaného do programu HEC-RAS

6.2.2 Úprava DMR 5G

Informace o reliéfu v okolí toku je do programu HEC-RAS vkládána v podobě rastru ve formátu *.tif. Za tímto účelem byl pro zájmové území v programu ArcGIS extrahován Digitální model reliéfu 5G dostupný z portálu ČÚZK. Výsledná vrstva pak byla převedena do rastru o velikosti buňky 0,25×0,25 m, kde každá buňka obsahovala informaci o nadmořské výšce.

6.2.3 Vytvoření modelu v programu HEC-RAS

Model úseku byl vytvořen ze dvou částí, 1D částí postihující samotné koryto toku a 2D částí postihující inundační území. Tvorba modelu a výpočty proběhly v několika krocích:

1. Vytvoření 1D části modelu.
2. Kalibrace 1D části modelu.
3. Vytvoření 2D části modelu.
4. Simulace proudění pro vybrané průtoky.

Vytvoření 1D části modelu

Prvním krokem pro vytvoření 1D modelu toku bylo vložení připraveného textového souboru *.csv z předchozího kroku viz kapitola 6.2.1. Takto byl získán základní tvar koryta ve souřadnicích S-JTSK. Byla zároveň provedena kontrola vložených příčných profilů.

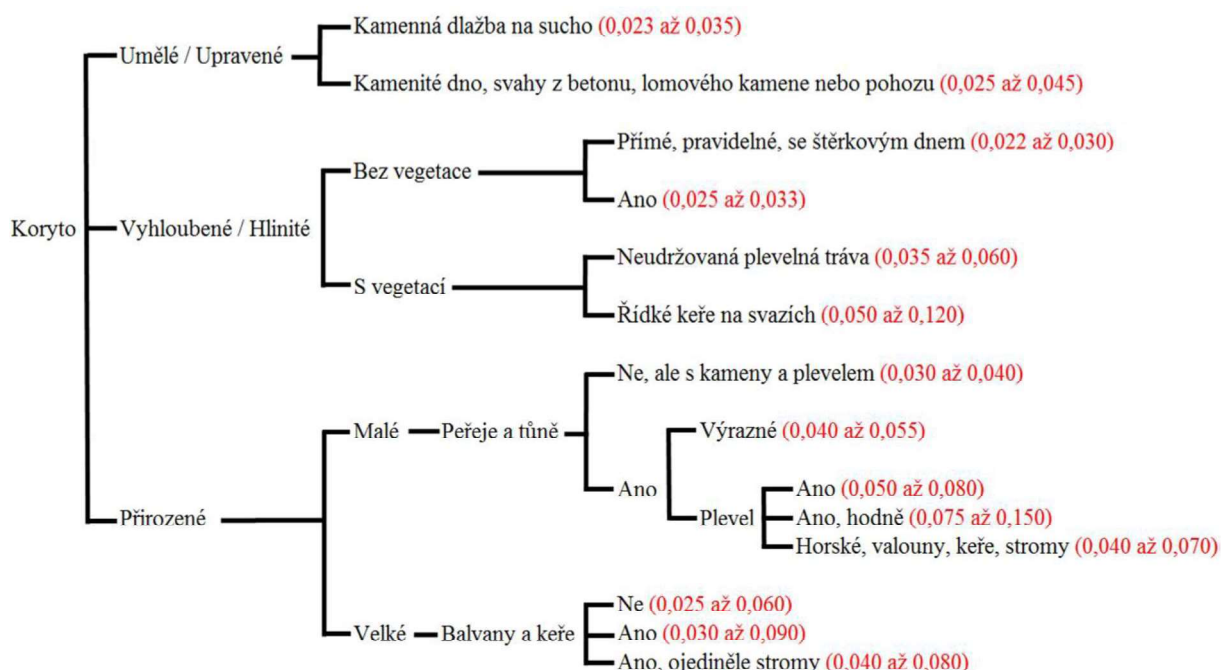
Následně byly do geometrie koryta vloženy objekty na toku viz Tabulka 5.10. Celkem bylo zahrnuto šest mostních konstrukcí či lávek a čtyři jezová tělesa, které ovlivňují proudění povrchové vody v toku. Geometrie objektů byla převzata z příčných profilů řeky Svitavy [A.2].

Pro Jezové objekty musel být zvolen součinitel přepadu, který nejlépe odpovídá tvaru konstrukce. Pro Jez Maloměřice a Jez Obřany nebyly uvažovány klapky či nástavky, jelikož dle Povodňového plánu města Brna^[2.5] mají být v případě povodňového ohrožení majiteli vyhrazeny. Zvolené součinitele přepadu viz Tabulka 6.1.

Tabulka 6.1 Volba součinitelů přepadu pro jezové objekty

Objekt	km	m	M
Jez Maloměřice	8,833	0,320	1,417
Jez Maloměřice II	9,620	0,380	1,683
Jez Cacovice	10,157	0,510	2,259
Jez Obřany	10,950	0,400	1,772

Následně byla geometrie doplněna o Manningův součinitel drsnosti n . Volba součinitele drsnosti je komplikovaná a neexistují pro ni striktně daná pravidla. Vhodný je například výběr na základě popisu tvaru, materiálu v korytě a jeho celkového charakteru. Ukázka rozhodovacího stromu pro výběr součinitele drsnosti viz Obrázek 6.2. Příkladem dále mohou být tabulky z manuálů programů, jako Tabulka 3-1 v manuálu k programu HEC-RAS^[2.3] nebo online výukové materiály a manuál programu ISIS 2D^{[3.7],[3.8]}.



Obrázek 6.2 Rozhodovací strom pro volbu součinitele drsnosti^[2.9]

Drsnosti v korytě a na březích byly voleny v rozmezí $n = 0,030-0,070$ na základě fotodokumentace, pochůzky a ortofotomap.

Následně byl pomocí nástroje RAS Mapper připojen rastr s digitálním modelem reliéfu. Za tímto účelem byl nejprve načten soubor *.prj, kterým se nastavuje správný koordinační systém pro RAS Mapper, tak aby odpovídal souřadnému systému, ve kterém byl vytvořen rastr DMR. Vložení rastru ve formátu *.tif byl v programu vytvořen nový terén pro výpočet 2D části modelu.

DMR nepostihuje s velkou přesností tvar samotného koryta, jelikož je vytvořen z dat pořízených leteckým laserovým skenováním výškopisu terénu a hladina vody v korytě zabraňuje přesnému zaměření dna koryta. Přesto z něj lze vyčíst trasu koryta. Z tohoto důvodu byly jednotlivé příčné profily porovnány s průběhem terénu v okolí a u některých byly zjištěny nesrovnalosti. Tyto nesrovnalosti byly pravděpodobně způsobené chybným určením průniku osy toku a dna příčného profilu. Po odstranění těchto nedostatků horizontálním posunutím profilů tak, aby se shodoval s terénem, byla otestována funkčnost 1D modelu a postoupilo se k samotné kalibraci 1D modelu.

Pro výpočet 1D části modelu byly zvoleny dvě okrajové podmínky. První okrajová podmínka byla zvolena v prvním profilu PF 104 km 8,080. Zde byla určena hloubka vody za ustáleného stavu při sklonu dna $i = 1,083\text{‰}$. Druhá okrajová podmínka byla zvolena v posledním profilu PF 202 km 10,0434. Zde bylo uvažováno s hydrografem o konstantním průtoku ve všech časových krocích: Q_5 , Q_{20} nebo Q_{100} viz Tabulka 5.9. Simulace byla nastavena jako neustálená z důvodu toho, že v kombinaci 1D a 2D neumožňuje řešení ustáleného stavu.

Kalibrace 1D části modelu

1D část modelu byla kalibrována na 100-letý průtok o $180 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ viz Tabulka 5.9.

Výsledné nadmořské výšky hladin byly porovnány se známými výškami hladin v podkladovém materiálu [A.2]. V úsecích, které prokazovaly vyšší odlišnost od známých výšek hladiny, proběhla kalibrace 1D modelu úpravou Manningova drsnostního součinitele na vybraných částech. Podařilo se dosáhnout přesností rozdílů hladin do $\pm 0,3 \text{ m}$.

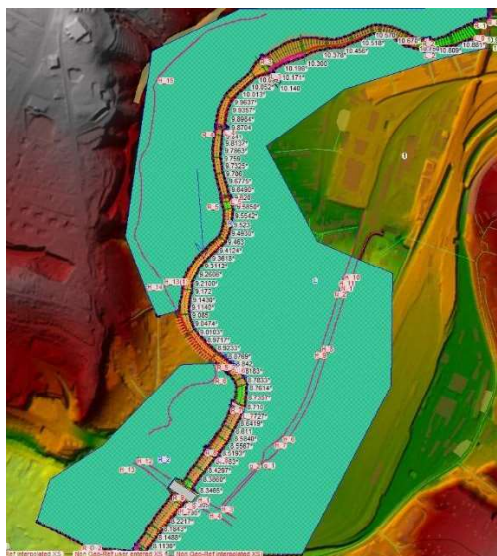
Vytvoření 2D části modelu

Dalším krokem bylo vytvoření dvourozměrné části modelu. Ta je v programu HEC-RAS tvořena polygonem, vymežujícím hranici 2D oblasti, a vnitřní výpočtovou sítí. Program pro výpočet této části využívá metodu konečných objemů. V modelu bylo rozhodnuto o vytvoření tří 2D oblastí paralelně k toku, dvě postihující inundační území pravého břehu, rozdělené úsekem, kde nebyl předpokládán rozliv, třetí postihující inundační území levého břehu viz

Obrázek 6.3. Výpočtová síť modelu si bere výšky DMR připojeného v prvním krku v rámci vytváření 1D části modelu.

2D část modelu sestává z:

- Laterální struktury propojující 1D a 2D.
- Polygon 2D oblastí s Break lines.
- Okrajové podmínky.

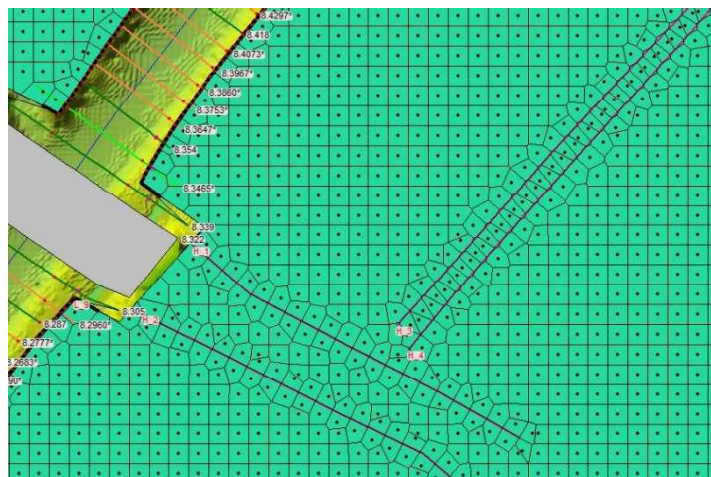


Obrázek 6.3 Polygony s výpočtovou sítí 2D oblasti

Přechod mezi 1D a 2D oblastí se uskutečňuje pomocí laterální struktury (hráze). Tyto laterální struktury je nejlépe umístit na vyvýšených místech souběžných s tokem jako například stávající hráze nebo pozemní komunikace apod. Kvůli charakteru úseku nebylo toto napojení zcela možné. Řeka prochází intravilánem, kde se často v bezprostřední blízkosti koryta nachází budovy. V jiných částech takové napojení nedovoluje okolní terén kvůli příliš strmým svahům. Laterální struktury byly proto umístěny v co nejtěsnější blízkosti břehů toku tak, aby bylo dosaženo co nejpřirozenějšího a nejplynulejšího napojení 1D a 2D části.

Výška struktury byla volena přibližně 0,05-0,2 m nad terénem z důvodu, že program nedovoluje, aby se 2D oblast nacházela výše než laterální struktura.

Polygon pro vytvoření výpočtové sítě byl zvolen tak, aby co nejpresněji kopíroval příslušné laterální struktury. Zároveň však nesměl protínat žádný z objektů na toku, tedy nesměl procházet přes profil před a za objektem. Velikost buněk v síti byla zvolena 8×8 m na základě požadované přesnosti výpočtů a jejich časové náročnosti viz Obrázek 6.4.



Obrázek 6.4 Ukázka výpočtového meshe

Posledním krokem před vytvořením 2D oblasti byla definice hran výpočtové sítě. Break lines (hrany) slouží pro lepší přesnost sítě a vkládají se tam, kde lze v terénu pozorovat výraznější zlomy, například silniční a železniční násypy, ochranné zdi apod. Na levém břehu se jednalo zejména o ulici Vrbí, která je značně vyvýšena nad okolní terén viz Obrázek 6.5. Na pravém břehu šlo například o skalnaté nábřeží výše od jezu Maloměřice.



Obrázek 6.5 Ukázka Break lines kopírující vyvýšenou ulici Vrbí

Po vytvoření sítě bylo nutné, podobně jako u 1D, části zvolit Manningův součinitel drsnosti. Program HEC-RAS umožňuje nastavení různých součinitelů drsnosti individuálních oblastí pomocí polygonů. Další možností je nastavit součinitele drsnosti podle využití území, které se do programu vkládá za pomoci rastru ve formátu *.tif. Za tímto účelem bylo použito celkem 8 vrstev *.shp z podkladových materiálů [A.5], které se vyskytovaly v okolí vybraného úseku. Ty byly upraveny v programu ArcGIS, kde byly jejich polygony sloučeny do jedné vrstvy a převedeny na rastr určující typy ploch o velikosti buňky 0,25×0,25 m tak, aby každý druh využití měl číselnou hodnotu 1-8 z důvodu jejich vzájemného rozlišení. Pomocí nástroje Land

Cover byl rastr vložen do programu HEC-RAS, se zachováním velikosti buňky $0,25 \times 0,25$ m. Pro všechny 2D oblasti v modelu byly nastaveny drsnosti podle využití území viz Tabulka 6.2. Zároveň byla nastavena jedna výchozí hodnota součinitele drsnosti $n = 0,045$ pro plochy, které nebyly pokryty žádnou z vybraných vrstev [A.5].

Tabulka 6.2 Volba součinitele drsnosti pro využití území

Využití území	Rozmezí n [-]	Volená hodnota n [-]	Číselná hodnota
Ulice	0,011-0,018	0,018	1
Cesta	0,011-0,018	0,018	2
Budovy	1,000	1,000	3
Lesní půda	0,080-0,120	0,100	4
Lesní půda stromy	0,100-0,160	0,140	5
Louka	0,030-0,050	0,050	6
Orná půda	0,025-0,045	0,045	7
Parkoviště	0,011-0,018	0,014	8
Ostatní plochy	-	0,045	-

Spojení 1D a 2D části modelu bylo uskutečněno pomocí vytvořených laterálních struktur, kde bylo nutno nastavit do které ze dvou 2D oblastí se voda přelévá přes konkrétní strukturu.

Okrajové podmínky 1D části modelu byly zachovány, tedy u prvního profilu PF 104 km 8,080 byl zvolen sklon dna $i = 1,083\%$. U posledního profilu PF 202 km 10,0434 byl zvolen hydrograf s konstantním průtokem v závislosti na prováděné simulaci: Q_5 , Q_{20} nebo Q_{100} viz Tabulka 5.9. Dále byla přidána okrajová podmínka pro 2D část modelu. Zvolena byla na spodních hranicích dvou 2D oblastí. Jedná se o výšku hladiny za ustáleného stavu v prvním profilu, PF 104 km 8,080. Tato okrajová podmínka se liší pro průtoky Q_5 , Q_{20} a Q_{100} .

Simulace proudění vody pro vybrané průtoky

Po kalibraci modelu 1D byl proveden výpočet kombinovaného modelu 1D a 2D. Pro výpočet byl stejně jako u samostatné 1D části nejprve zvolen průtok $Q_{100} = 180 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Okrajovou podmínkou na spodní části 2D oblastí byla v tomto případě výška hladiny $H = 206,01$ m n. m., která odpovídá výšce hladiny vypočtené z 1D části modelu. Pro 2D část modelu musela být stanovena nová počáteční podmínka. Zvolena byla výška hladiny v posledním profilu, PF 202 km 10,0434, $H = 213,86$ m n. m. rovněž vypočtená z 1D části modelu.

Výsledné rozlivy byly porovnány se známými rozlivy z podkladových materiálů [A.7], tak aby bylo dosaženo co největší podobnosti. Vzhledem k mnoha nesrovnalostem bylo nutné ve vybraných problematických místech 2D model upravit (kalibrovat). Upraveno bylo navázání

1D a 2D části modelu tak, aby nedocházelo k vzniku překážek bránících rozlivu do 2D oblasti. Další zpřesnění modelu bylo provedeno změnou drsností pokryvu využití území. Při těchto úpravách bylo také sledováno, jak se po spojení 1D a 2D části rozlivu změnily nadmořské výšky hladin v 1D části modelu. Poté co nebyly pozorovány výrazné rozdíly mezi hladin vypočtených v samostatné 1D části modelu a hladin vypočtených po spojení 1D a 2D části byly úpravy ukončeny. Prvním hydraulickým výpočtem byly tedy získány rastry rozlivů, hloubek a rychlostí pro průtok Q_{100} .

Následně byl proveden výpočet pro $Q_{20} = 123 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Okrajová podmínka 2D oblastí v prvním profilu, PF 104 km 8,080, byla změněna na $H = 205,27 \text{ m n. m}$ a počáteční podmínka v posledním profilu, PF 202 km 10,0434, na $H = 213,23 \text{ m n. m}$. Tímto byly získány rastry rozlivů, hloubek a rychlostí pro průtok Q_{20} .

Třetí provedený výpočet byl pro $Q_5 = 83,0 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Obdobně jako v předchozích výpočtech byla zvolena okrajová podmínka 2D oblastí, a to hloubka v prvním profilu, PF 104 km 8,080, $H = 204,79 \text{ m n. m}$. Jelikož v posledním profilu, PF 202 km 10,0434, nedochází k rozlivu, nebyla počáteční podmínka pro 2D oblast uvažována. Třetím výpočtem byly získány rastry rozlivů, hloubek a rychlostí pro průtok Q_5 .

6.2.4 Zpracování výsledků

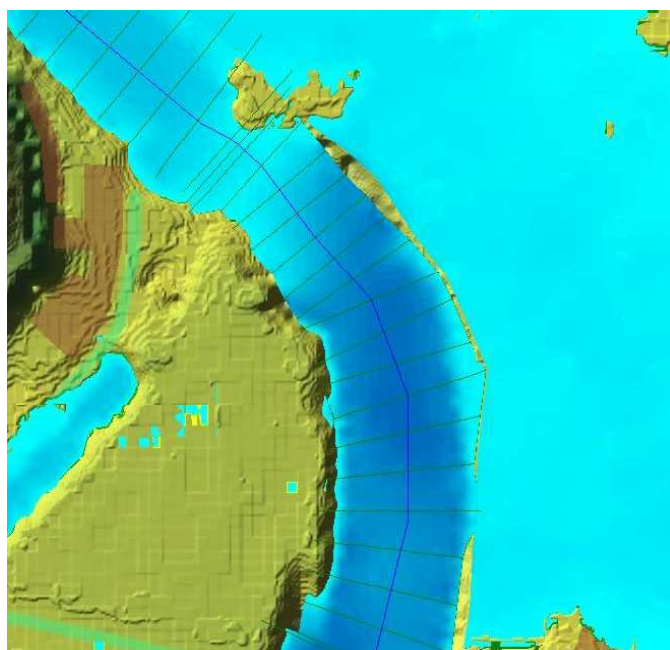
Výstupy z programu HEC-RAS byly rastry rozlivů, hloubek a rychlostí ve formátu *.tif. Ty byly vloženy jako vrstvy do programu ArcGIS. Pro správné zobrazení bylo nutné u rastrů převést souřadnicový systém na S-JTSK. V programu ArcGIS byly rastry upraveny a využity pro tvorbu příloh [B.3] až [B.11]. Úpravy byly provedeny dle Metodiky tvorby map povodňového nebezpečí a povodňových rizik^[2,10].

6.3 VÝSLEDKY HYDRAULICKÝCH VÝPOČTŮ

Při zhodnocení výsledků byly zjištěny určité rozdíly mezi výslednými rozlivy z výpočtů a rozlivy z podkladových materiálů [A.7]. Jedním z možných důvodů rozdílů byla odlišnost vstupních dat. Zaměřené příčné profily podkladu [A.2] nebyly dostatečně podrobné a v řadě případech se neshodovaly s DMR 5G. Nadto existovaly určité nesrovnalosti v umístění profilů na ose toku. To byla komplikace zejména v případech, kdy nebyly profily vyznačeny v situaci. Poloha profilů v rámci osy toku se nedala vždy přesně určit, kdy staničení profilů nemuselo odpovídat skutečným vzdálenostem. Z těchto důvodů bylo přistoupeno k ruční úpravě profilů jejich posunutím v rámci ose příčný profilů. Někdy bylo nutné neuvažovat části zaměřené

mimo vlastní koryto, v místech, kde byl výrazný rozdíl mezi DMR a profilem. Často však zaměření terénu mimo koryto úplně chybělo a z tohoto důvodu bylo problematické napojení 1D a 2D.

Po provedení těchto úprav bylo problematické správně umístit napojení 1D a 2D oblasti, která musela být umístěna až za samotný profil koryta. To se projevilo vznikem částí paralelně s korytem, popřípadě kolem objektů, ve kterých neproudí voda viz Obrázek 6.6. Takovýto tvar neodpovídá předpokládanému proudění mezi 1D a 2D částí. Pro odstranění těchto nepřesností je nutno lépe provázat zaměření koryta a DMR 5G.



Obrázek 6.6 Nepřesnost výsledných rastrů - 1

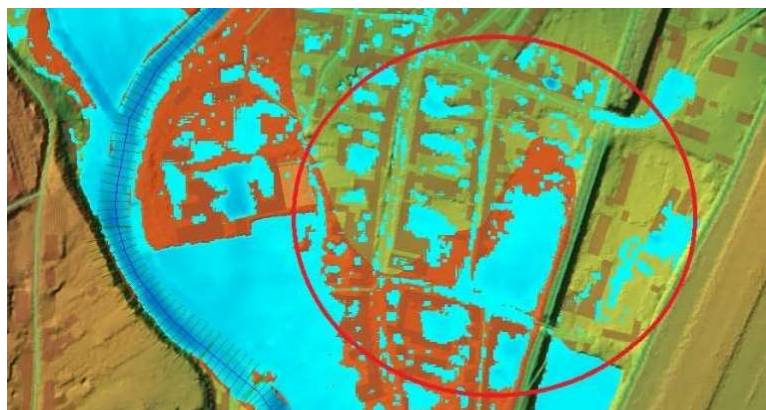
Dalším důvodem rozdílných výsledků mohl být naopak digitální model reliéfu. Ač se DMR 5G vyznačuje celkem vysokou přesností, vyskytlo se několik problematických míst viz Obrázek 6.7. Červeně jsou vyznačeny dvě takovéto oblasti. První menší oblast je oplocené fotbalové hřiště. Druhá větší oblast je oplocený průmyslový areál. Právě v místě oplocení vzniká výraznější rozdíl v nadmořských výškách reliéfu a není zcela zřejmé, zda jsou oblasti skutečně vyvýšeny nad okolím nebo jde o nepřesnost způsobenou zvolenou metodou vyhodnocení DMR. V těchto případech by bylo nejvhodnější provést přesné zaměření objektů přímo v terénu a opakovat hydraulické výpočty.



Obrázek 6.7 Nepřesnost výsledných rastrů - 2

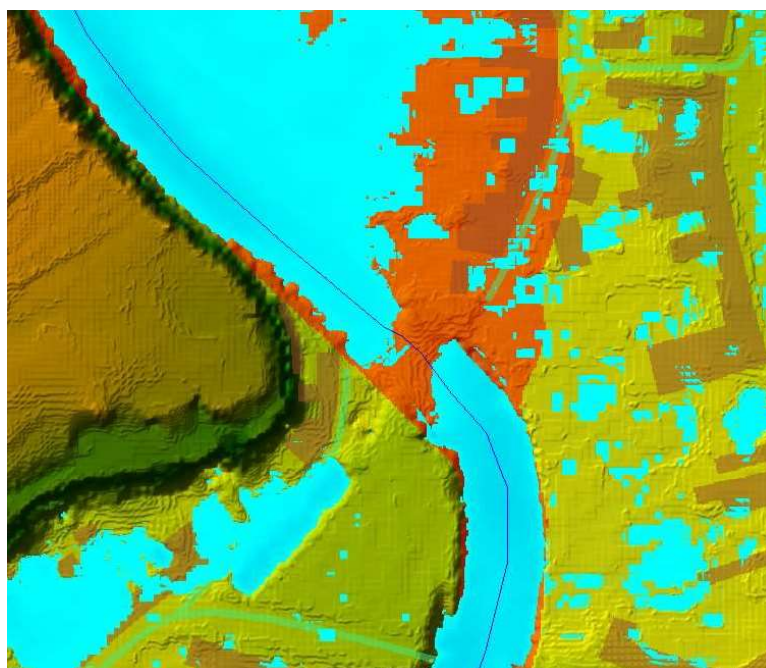
Při porovnání rozlivů z hydraulických výpočtů a rozlivů z podkladů [A.7] bylo v některých místech možné pozorovat výraznější rozdíly. V oblasti viz Obrázek 6.8 jsou vidět modře rozliv Q_{100} z výpočtů a na pozadí tmavě oranžově rozliv Q_{100} z podkladů. Lze předpokládat, že výpočtem v programu HEC-RAS díky využití 1D a 2D a také díky novějšímu DMR, by mělo být dosaženo přesnějšího stanovení hloubek a rozlivů vody.

Na oblasti viz Obrázek 6.8 lze dále vidět v červeně vyznačené oblasti osamocené skupiny vodních ploch. Tyto a podobné plochy nelze vždy uvažovat do rozlivu, jelikož v některých případech mají nadmořskou výšku hladiny o více než 1 m vyšší, než je hladina v korytě za ustáleného stavu. Navíc výška terénu v jejich okolí naznačuje, že nemusí být přirozeně propojeny z oblastí rozlivu. Vznik těchto ploch může být také dán vysokou nadmořskou výškou hladiny u počáteční podmínky. Pro spolehlivější určení, zda je nutné plochy zahrnout do rozlivu by bylo vhodné další zaměření terénu. Zejména by se jednalo o pozemní komunikace, propustky a podjezdy, které by mohly propojovat jednotlivé plochy.



Obrázek 6.8 Nepřesnosti výsledných rastrů – 3

Při vyhodnocení rastrů z programu HEC-RAS, bylo pozorováno, že v místě některých objektů, konkrétně jezu Maloměřice a Obřanského mostu, došlo k přerušení rozlivu. Rozliv v okolí jezu Maloměřice viz Obrázek 6.9. Zřejmě se jedná o problém při metody výpočtu programu HEC-RAS, kdy dochází ke špatné kombinaci DMR a příčných profilů.



Obrázek 6.9 Nepřesnosti výsledných rastrů - 4

7 NÁVRH PPO

Úseky, ve kterých dochází k vybřežení při průtoku Q_{100} , je nutné ochránit vhodným protipovodňovým opatřením. V následující kapitole je uveden stručný přehled možných druhů ochrany před povodněmi. Dále je proveden návrh PPO v zájmovém úseku.

7.1 PROTIPOVODŇOVÁ OPATŘENÍ

Protipovodňová opatření zahrnují širokou škálu činností, kterými se lidé snaží bránit ničivým důsledkům povodně, ať úsilím o snížení jejích dopadů nebo předejitím jejímu vzniku. Následující text vychází z přehledu PPO dle studijních opor Fakulty stavební VUT v Brně^[2.11].

Podle jejich charakteru se dají opatření rozdělit na strukturální a nestrukturální.

7.1.1 Strukturální

Strukturální opatření jsou opatření spíše technické povahy. Mají za cíl fyzicky transformovat průběh případné povodně, tak, aby vlna nezasáhla do území vyžadujících ochranu, například oblastí se zástavbou rodinnými domy, průmyslové areály, nemocnice apod.

Zvýšení kapacity koryta

Zvýšení kapacity koryta má za následek rychlý odchod povodňové vlny z území. Větší kapacity lze docílit například rozšířením celého koryta, nebo rozšířením o bermy. Dále je možno upravit sklonové poměry, zejména v případě velkých nánosů je v některých částech žádoucí uplatnit bagrování. Další překážkou pro rychlý odtok mohou být různé objekty, jako mosty, jezy apod. a mnohdy stojí za úvahu jejich úpravy pro zkapacitnění.

Ochranné hráze

Ochranné hráze jsou příkladem strukturálního opatření, které má za cíl soustředění toku do mezihrází a tím zvýšit kapacitu koryta až do určitého průtoku. Jedná se o v historii velmi často využívaný druh ochrany, a i dnes v případech, kde není možnost zajistit kapacitu jinými vhodnějšími způsoby je jednou z volených možností. Zejména u hrází vybudovaných v minulosti existuje vyšší riziko jejich porušení z několika důvodů jako volba nevhodných materiálů, nedostatečný průzkum geologických podmínek aj. Příklad ochranné hráze viz Obrázek 7.1.

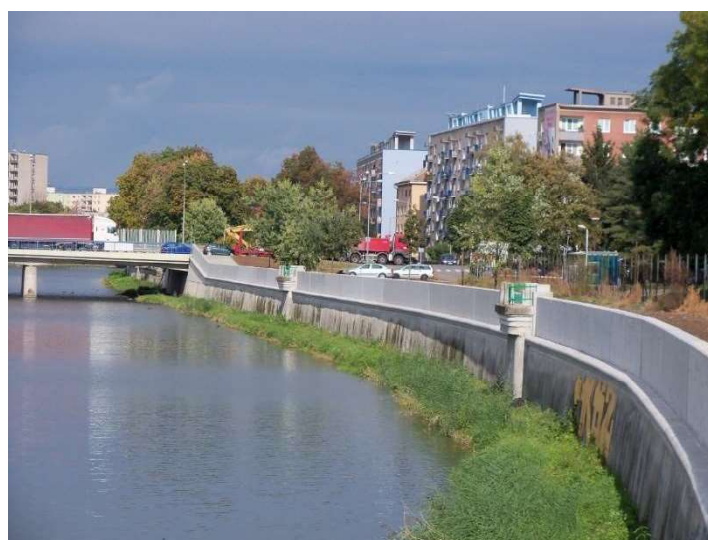


Obrázek 7.1 Ukázka ochranné hráze^[4.1]

Povodňové zdi

Povodňové zdi jsou obdobou ochranných hrází. Navrhují se v místech, které kvůli nedostatku prostoru nedovolují výstavbu jiných opatření, například se jedná o těsnou blízkost zástavby.

Povodňové zdi lze rozdělit na stabilní a mobilní. Stabilní jsou obvykle betonové konstrukce založené do podloží a jejich umístění má trvalý charakter. Mobilní jsou naopak umísťovány dočasně, zejména v místech, kde by pevné nastalo umístění konstrukce byly esteticky nevhodné, popřípadě kde je z určitých důvodů nutné zajistit průchod. Tam, kde jsou navrženy mobilní povodňové stěny, jsou většinou předpřipravené prvky pro jejich rychlé osazení.



Obrázek 7.2 Ukázka stabilní povodňové zdi^[4.2]

Umělé retenční prostory

Umělými retenčními prostory jsou ovladatelné a neovladatelné prostory údolních nádrží. Jejich využití je dáno zejména manipulačním řádem vodního díla a z velké části závisí na přednostním účelu nádrže, které může být v rozporu s požadavky na transformaci povodně, to především ve vztahu k potřebnému prázdnému prostoru v celkovém objemu nádrže.

Zvýšení retenční schopnosti krajiny

Jedná se o soubor organizačních, agrotechnických a biotechnických protierozních opatření, které napomáhají retenčnímu účinku krajiny, ale zejména mají vysoký význam ve smyslu péče o krajinu a krajinotvorby. Jejich vliv nabývá na podstatě zejména u povodní nižší intenzity (Q_{10} až Q_{20})

7.1.2 Nestrukturální

Jsou především opatření, která mají organizační a plánovací charakter. Dle zákona 254/2001 se dělí na:

- přípravná opatření a opatření při nebezpečí povodně,
- opatření za povodně.

Nestrukturální přípravná opatření zahrnují celou škálu činností jako stanovování záplavových území, vypracování povodňových plánů a stanovení limitů pro jednotlivé stupně povodňové aktivity aj. Do této kategorie také spadá předpovědní a hlášená povodňová služba. Nestrukturální opatření za povodně jsou například povodňové zabezpečovací a záchranné práce.

7.2 IDEOVÝ NÁVRH PPO

Většina zaplaveného území je zastavěna rodinnými domy nebo průmyslovými objekty. Je tedy potřeba přistoupit k návrhu vhodné protipovodňové ochrany. Úsek leží v intravilánu města Brna a nelze tedy uvažovat s výstavbou ochranných hrází a jiná zvýšení kapacit koryta jsou také značně omezená. V úvahu tedy přichází zejména povodňové zdi. Navrhnuty byly v následujících úsecích na průtok Q_{100} :

- P01. Km 8,310-8,692 - levý břeh
- P02. Km 8,310-8,692 - pravý břeh
- P03. Km 8,310-9,862 – levý břeh
- P04. Km 9,238 – pravý břeh kolem vyústění náhonu
- P05. Km 10,378-10,750 – levý břeh

P06. Km 10,217-10,750 – pravý břeh

Návrh PPO je podrobně zobrazen v příloze [B.12].

P01. Km 8,310-8,692 - levý břeh

Stabilní povodňová zeď v tomto úseku je navržena v délce 368 m. Na jednom konci je zavázána do Husovického mostu km 8,310 a na druhém konci do Maloměřického mostu km 8,692. V oblasti je nutné ochránit zástavbu rodinných domů. Hloubka vody v rozlivu se pohybuje mezi 0,2 - 0,3 m, proto je výška navržené povodňové zdi 0,6 m. V místě navázání do Husovického mostu prochází povodňová zeď přes pozemní komunikaci. V místě křížení PPO a komunikace je navrženo mobilní hliníkové hrazení.

P02. Km 8,310-8,692 – pravý břeh

Rozliv postihující zástavbu rodinných domů je způsoben zejména zpětným vzduťm na vyústění náhonu. Hloubka vody v rozlivu dosahuje nejvíce 0,3 m. Pro účinnou ochranu zástavby je navržena stabilní železobetonová povodňová zeď o délce 235 m a výšce 0,6 m, která je zavázána do Husovického mostu km 8,310. Zeď prochází po straně náhonu a končí na hranici zvýšeného terénu areálu se sklady a firmami. (P02_3) Stejně jako na levém břehu zeď prochází v místě zavázání do husovického mostu přes pozemní komunikaci. Je tedy nutné v tomto místě přejít na mobilní hliníkové hrazení.

Další část v délce 316 m navazuje na hranici stejného areálu a pokračuje podél toku, kde je na druhém konci zavázána do Maloměřického mostu km 8,692 (P02_2). Umístění dvou oddělných povodňových zdí umožňuje rozliv přes tenisové kurty.

P03. Km 8,692-9,862 – levý břeh

V úseku je navržena stabilní železobetonová povodňová zeď v délce 1 255 m. V rozlivu je dosaženo hloubky až 0,8 m. Povodňová zeď o výšce 1,1 m má za účel ochránit průmyslový areál a zástavbu rodinných domů. Na jednom konci je zavázána do Maloměřického mostu km 8,692. Dále PPO prochází souběžně s tokem a končí ve stoupajícím terénu km 9,862 za zástavbou.

P04. Km 9,238 – pravý břeh kolem vyústění náhonu

Stabilní železobetonová povodňová zeď má za účel ochránit osamocenou skupinu domů u zaústění náhonu km 9,238. Rozliv zpětným vzduťm má hloubku 0,6 m. Navržená zeď o délce 200 m a výšce 0,9 m je z obou stran ukončena výrazně se zvyšujícím terénem.

P05. Km 10,378-10,750 – levý břeh

V úseku se vyskytuje rozliv o hloubce až 1,2 m a je tedy nutné ochránit zástavbu rodinných domů, které se nachází souběžně s tokem. Stabilní železobetonová povodňová zeď je navržena ve výšce 1,5 m a délce 463 m. Na jedné straně začíná ve zvyšujícím se terénu km 10,378 na hranici zástavby. Na druhé straně je zeď zavázána do Obřanského mostu km 10,750.

P06. Km 10,217-10,750 – pravý břeh

Podobně jako v předchozím úseku i zde dosahuje hloubka rozlivu až 1,2 m a je nutné pro ochranu zástavby navrhnout stabilní železobetonovou povodňovou zeď o výšce 1,5 m. Zeď o délce 580 m na jedné straně začíná ve zvyšujícím se terénu za hranicí pozemků km 10,217 a končí zavázáním do Obřanského mostu km 10,750.

7.3 ZHODNOCENÍ NÁVRHU PPO

Jak bylo zmíněno v kapitole 6.3 existují určitá místa, ve kterých není zcela zřejmé, zda dojde k rozlivu. Na levém břehu mezi km 8,692 - 9,862 byla navržena povodňová zeď v délce 1 255 m. Tento úsek zahrnuje ochranu kolem průmyslového areálu, který se dle DMR 5G vyvyšuje nad okolní terén a není rozlivem zasažen. Vzhledem k těmto nejasnostem bylo přistoupeno k bezpečnější variantě návrhu, který předpokládá zatopení areálu. Po přesnějším zaměření a hydraulickém výpočtu by bylo v opačném případě možné navrhnout variantu povodňové zdi, která se zavazuje do vyvýšeného terénu areálu.

Další problematickou oblastí je náhon kolem Cacovického ostrovu mezi km 9,238 - 9,862. V místě je zapotřebí přesně vyhodnotit míru zpětného vzdutí a způsob manipulace náhonu.

Samotný návrh PPO je ideový. Pro zhodnocení navržené PPO by bylo vhodné v dalším kroku provést hydraulický výpočet s navrženou ochranou. Dalšími kroky při návrhu PPO by bylo provedení rizikové analýzy, tedy vytvoření map povodňového ohrožení a map povodňového rizika. Dále by bylo potřeba vyčíslení potenciálních škod způsobených povodní a potenciálních škod po návrhu PPO, spolu s náklady na výstavbu PPO. V rámci těchto kroků by bylo také nutné vyšetřit stav týkající se pozemků, na kterých se navržená ochrana nachází. Je žádoucí, pokud to situace dovolí, aby PPO neprocházela přes pozemky v soukromém vlastnictví. V případě, že je to nevyhnutelné je zapotřebí jednat s jejich majiteli. Konkrétní návrh PPO by také vyžadoval geologický průzkum a statické posouzení konstrukce. Zejména vyšetření proudění podzemní vody kolem základu povodňové zdi.

8 ZÁVĚR

Za účelem vyhodnocení povodňové situace na řece Svitavě v Brně byly provedeny hydraulické výpočty proudění povrchové vody v korytě a následně byl proveden ideový návrh protipovodňových opatření.

Kapitola 6 Hydraulické výpočty popisuje tvorbu modelu pro simulaci proudění. Model byl vytvořen v programu HEC-RAS a byl rozdělen na dvě části. Model 1D byl využit pro simulaci proudění korytem řeky a model 2D byl využit pro proudění v inundační části území. Při samotné tvorbě geometrie koryta se objevilo několik komplikací. Bylo nutné převést zaměřená data z příčných profilů ve formátu *.dxf do textového souboru *.csv, který obsahuje údaje o všech bodech profilů koryta a lze jej vložit do programu HEC-RAS. Příčné profily, ale neměly žádné údaje o georeferencích a bylo tedy nutné je za pomoci známých referencí na ose toku dopočítat. Podrobnější popis postupu viz kapitola 6.2.1.

Další komplikací byla volba napojení 1D a 2D částí modelu. Příčné profily, které byly pro tvorbu 1D modelu využívány, neměly vždy dostatečně přesně zaměřené blízké okolí koryta. Díky tomu bylo obtížné zvolit co nejvhodnější přechod geometrie koryta na digitální model reliéfu DMR 5G.

Byla provedena simulace tří průtoků Q_5 , Q_{20} a Q_{100} . Výsledné rozlivy byly vyhodnoceny a porovnány se známými rozlivy z podkladových materiálů. Byly zjištěny určité odlišnosti rozlivů. Tyto odlišnosti v rozlivech byly pravděpodobně způsobené rozdílnými podkladovým daty nebo využitím novějšího DMR. Další vliv měl samotný postup tvorby modelu, například již zmíněné napojení 1D a 2D oblastí. Podrobněji viz kapitola 6.3.

Po vyhodnocení výsledů hydraulických výpočtů byly zpracovány přílohy [B.3] až [B.11], Mapy rozlivů, hloubek a rychlostí pro všechny simulované průtoky Q_5 , Q_{20} a Q_{100} .

Kapitola 7 se zabývá návrhem PPO. S využitím výstupních map rozlivů hloubek byl proveden ideový návrh protipovodňových opatření. Navrženy byly povodňové zdi a různých výškách v závislosti na hloubce vody v rozlivu při průtoku Q_{100} . Opatření byla umístěna v oblastech, která je zapotřebí ochránit, jako jsou zástavby rodinných domů, průmyslové areály aj. Situace s PPO je znázorněna v příloze [B.12] a vzorový příčný profil ideového návrhu PPO v příloze [B.13]. Zhodnocení návrhu PPO a námět na další postup při jejich návrhu jsou rozebrány v kapitole 7.3.

9 CITOVANÁ LITERATURA

9.1 PODKLADOVÁ STUDIE

- [1.1] POVODÍ MORAVY, S.P. Generel odvodnění města Brna – část toky, č. 15 Svitava, *Podélný profil km 0,000 – km 11, studie*. Povodí Moravy, ředitelství s.p., Brno, Dřevařská 11, 2007.
- [1.2] POVODÍ MORAVY, S.P. Generel odvodnění města Brna – část toky, č. 15 Svitava, *Příčné profily PF 1–245, studie*. Povodí Moravy, ředitelství s.p., Brno, Dřevařská 11, 2007

9.2 LITERATURA

- [2.1] JANDORA, Jan a Jan ŠULC. *Hydraulika: modul 01*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2007. Studijní opory pro studijní programy s kombinovanou formou studia. ISBN 978-80-7204-512-9.
- [2.2] BRUNNER, Gary W. *HEC-RAS River Analysis System Hydraulic Reference Manual*. US Army Corps of Engineers, Institute for Water Recourses, Davis, California, 2016-02. Dokumentace počítačového programu.
- [2.3] BRUNNER, Gary W., CEIWR-HEC. *HEC-RAS River Analysis System User's Manual, Version 5.0*. US Army Corps of Engineers, Institute for Water Recourses, Davis, California, 2016-02. Dokumentace počítačového programu.
- [2.4] HÁLOVÁ-JAHODOVÁ, Cecilie. Brno: dílo přírody, člověka a dějin. 2. uprav. (rozšíř.) vyd. Brno: Blok, 1975, 190 s.
- [2.5] MAGISTRÁT MĚSTA BRNA. Odbor vodního a lesního hospodářství a zemědělství. *Povodňový plán statutárního města Brna*. Brno, 2015-05.
- [2.6] ŠTĚPÁNOVÁ, Markéta. *Revitalizace toků pro ryby*. Brno, 2013. 38 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodního hospodářství krajiny. Vedoucí práce Ing. Rudolf Milerski, CSc.
- [2.7] BRÁZDIL, Rudolf, Hubert VALÁŠEK a Eva SOUKALOVÁ. *Povodně v Brně: historie povodní, jejich příčiny a dopady*. Brno: Statutární město Brno, 2010. Brno v minulosti a dnes. ISBN 978-80-86736-22-8.

- [2.8] USUL, Nurünnisa; YILMAZ, Musa. *Estimation of instantaneous unit hydrograph with Clark's Technique in GIS*. In: Proceedings of 2002 ESRI international user conference, USA. 2002.
- [2.9] SMELÍK, Lukáš. *Návrh metodiky stanovení součinitele drsnosti otevřených koryt*. Brno, 2015. 131 s., 71 s. příl. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodních staveb. Vedoucí práce Ing. Hana Uhmánová, CSc
- [2.10] VÝZKUMNÝ ÚSTAV VODOHOSPODÁŘSKÝ T. G. MASARYKA
Metodika tvorby map povodňového nebezpečí a povodňových rizik. Červen 2011.
- [2.11] DRÁB, Aleš a Jaromír ŘÍHA. *Protipovodňová ochrana: modul M 01*. Brno. 2010. Studijní opory pro studijní programy s kombinovanou formou studia

9.3 WEBOVÉ STRÁNKY

- [3.1] ČESKÝ HYDROMETEOROLOGICKÝ ÚSTAV. Meteorologie. *Územní teploty* [online]. 2016 [cit. 2016-12-31]. Dostupné z: <http://portal.chmi.cz/historicka-data/pocasi/uzemni-teploty#>
- [3.2] ČESKÝ HYDROMETEOROLOGICKÝ ÚSTAV. Meteorologie. *Územní srážky* [online]. 2016 [cit. 2016-12-31]. Dostupné z: <http://portal.chmi.cz/historicka-data/pocasi/uzemni-srazky#>
- [3.3] ČESKÝ HYDROMETEOROLOGICKÝ ÚSTAV. *Sít' monitoringu povrchových vod* [online]. 2016 [cit. 2016-12-03]. Dostupné z: <http://hydro.chmi.cz/hydro/>
- [3.4] ČESKÝ HYDROMETEOROLOGICKÝ ÚSTAV. *Hlásná a předpovědní služba* [online]. 2016 [cit. 2016-12-03]. Dostupné z: <http://portal.chmi.cz/#!>
- [3.5] POVODÍ MORAVY. *Vodní díla* [online]. 2016 [cit. 2016-12-31]. Dostupné z: <http://www.pmo.cz/cz/uzitecne/vodni-dila/>
- [3.6] DUŠAN, Josef, *Encyklopedie mostů v Čechách na Moravě a ve Slezsku* [online databáze]. 2016 [cit. 2016-10-01]. Dostupné z: <http://libri.cz/databaze/mosty>
- [3.7] ISIS. *e-Learning River Hydraulics with ISIS, Cost Effective, Integrated Software Solutions* [online] 2016 [cit 2016-11-01]. Dostupné z: http://help.floodmodeller.com/elearning/riverhydraulics/Web_Pages/Steady_Uniform_Flow_Basic_Theory.htm

- [3.8] ISIS. User Manual. Cost Effective, Integrated Software Solutions. Roughness [online]. 2016 [cit. 2016-11-01]. Dostupné z:
http://help.floodmodeller.com/isis/mergedProjects/ISIS%202D/Preparing_Spatial_Data/3_7_Roughness.htm
- [3.9] VÝZKUMNÝ ÚSTAV VODOHOSPODÁŘSKÝ T. G. MASARYKA. Oddělení geografických informačních systémů a kartografie. Struktura DIBAVOD [online databáze]. 2016 [cit. 2016-10-20]. Dostupné z:
<http://www.dibavod.cz/index.php?id=27>
- [3.10] ČESKÝ ÚŘAD ZEMĚMĚŘICKÝ A KATASTRÁLNÍ. Geoportál ČÚZK, přístup k mapovým produktům a službám resortu. *WMS: ZM 25, ZM 50, Ortofoto, Správní hranice, DMR 5G* [síťové služby]. 2016 [cit. 2016-09-08]. Dostupné z:
[http://geoportal.cuzk.cz/\(S\(mfwaex04gqqrncycackpkagp4\)\)/Default.aspx?mode=TextMeta&side=wms.verejne&text=WMS.verejne.uvod&head_tab=sekce-03-gp&menu=311](http://geoportal.cuzk.cz/(S(mfwaex04gqqrncycackpkagp4))/Default.aspx?mode=TextMeta&side=wms.verejne&text=WMS.verejne.uvod&head_tab=sekce-03-gp&menu=311)

9.4 FOTOGRAFIE

- [4.1] EVROPSKÝ FOND REGIONÁLNÍHO ROZVOJE. Mikroprojekt programu přeshraniční spolupráce Slovenská republika – Česká republika 2007-2013. Možnosti řešení povodňových situací v československém příhraničí. *Protipovodňová opatření* [online]. 2016 [cit. 2016-12-31] Dostupné z: <http://www.cs-povodne.eu/Protipovodnova-ochrana-a-povodne/Protipovodnova-opatreni>
- [4.2] POVODÍ MORAVY, S.P. Tiskové zprávy. *Protipovodňové stavby běží podle plánu* [online článek] 2016-11-28, 2016-12-01 [cit. 2016-12-31] Dostupné z:
<http://www.pmo.cz/cz/media/tiskove-zpravy/protipovodnove-stavby-bezi-podle-planu/>
- [4.3] Mapio.net. Realitní inzertní server [online databáze]. 2016 [cit. 2016-01-12] Dostupné z: <http://mapio.net/pic/p-55134413/>

SEZNAM TABULEK

Tabulka 5.1 Geomorfologické jednotky, kterými protéká řeka Svitava ^[2.7]	17
Tabulka 5.2 Hydrogeologické rajony, přes které prochází povodí Svitavy ^[2.7]	18
Tabulka 5.3 Průměrné měsíční teploty pro Pardubický a Jihomoravský kraj v roce 2015 ^[3.1] ..	19
Tabulka 5.4 Průměrný měsíční úhrn srážek pro Pardubický a Jihomoravský kraj v roce 2015 ^[3.2]	19
Tabulka 5.5 Profily pro sledování měsíčního množství vod ^[3.3]	22
Tabulka 5.6. Hlásné profily povodňové služby pro řeku Svitavu ^[3.4]	22
Tabulka 5.7 N-leté průtoky v hlásných profilech ^[3.4]	23
Tabulka 5.8 N-leté průtoky dle povodňového plánu města Brna ^[2.5]	23
Tabulka 5.9 N-leté průtoky dle podkladových materiálů[A.1] ^[1.1]	23
Tabulka 5.10 Seznam objektů nacházejících se na úseku od km 8,085 - 10,950 ^[1.2]	26
Tabulka 6.1 Volba součinitelů přepadu pro jezové objekty	39
Tabulka 6.2 Volba součinitele drsnosti pro využití území	43

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 4.1 Grafické znázornění členů rovnice (4.9) ^[2.2]	9
Obrázek 4.2 Schéma složeného koryta	10
Obrázek 4.3 Závislost hloubky na energetické výšce ^[2.2]	12
Obrázek 4.4 Schéma pro řešení 1D proudu na výseku o délce delta x ^[2.2]	13
Obrázek 5.1 Povodí Svitavy v rámci ČR a lokalizace zájmového úseku	16
Obrázek 5.2 Zájmový úsek v rámci města Brna	16
Obrázek 5.3 Svitava a její přítoky	21
Obrázek 5.4 Ukázka koryta km 8,085 (duben 2013)	24
Obrázek 5.5 Ukázka jezové zdrže nad jezem Maloměřice km 8,833 (duben 2013) ^[2.6]	25
Obrázek 5.6 Jez Maloměřice km 8,833 (duben 2013) ^[2.6]	27
Obrázek 5.7 Jez Maloměřice II km 9,620 (duben 2013) ^[2.6]	27
Obrázek 5.8 Jez Cacovice km 10,157 (duben 2013) ^[2.6]	28
Obrázek 5.9 Jez Obřany pohled 2 km 10,962 (duben 2013) ^[2.6]	29
Obrázek 5.10 "Husovický most" km 8,310 (duben 2013)	30
Obrázek 5.11 "Maloměřický most" km 8,692 (duben 2013)	30
Obrázek 5.12 "Obřanský most" km 10,775 ^[4.3]	31
Obrázek 5.13. "Železniční most Obřany" km 11,002 (duben 2013) ^[2.6]	31
Obrázek 6.1 Ukázka souboru exportovaného do programu HEC-RAS	38
Obrázek 6.2 Rozhodovací strom pro volbu součinitele drsnosti ^[2.9]	39
Obrázek 6.3 Polygony s výpočtovou sítí 2D oblasti	41
Obrázek 6.4 Ukázka výpočtového meshe	42
Obrázek 6.5 Ukázka Break lines kopírující vyvýšenou ulici Vrbí	42
Obrázek 6.6 Nepřesnost výsledných rastrů - 1	45
Obrázek 6.7 Nepřesnost výsledných rastrů - 2	46
Obrázek 6.8 Nepřesnosti výsledných rastrů – 3	47

Obrázek 6.9 Nepřesnosti výsledných rastrů - 4.....	47
Obrázek 7.1 Ukázka ochranné hráze ^[4.1]	49
Obrázek 7.2 Ukázka stabilní povodňové zdi ^[4.2]	49

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

A	- Průtočná plocha [m^2]
B	- Šířka profilu v hladině [m]
C	- Chézyho rychlostní součinitel [$\text{m}^{0.5} \cdot \text{s}^{-1}$]
ČÚZK	- Český úřad zeměměřický a katastrální
DIBAVOD	- Digitální báze vodohospodářských dat
DMR	- Digitální model reliéfu
F	- Síla [N]
g	- Tíhové zrychlení [$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$]
h	- Hloubka vody [m]
H	- Geodetická výška hladiny [m n. m.]
h_e	- Ztráta energetické výšky
h_s	- Střední hloubka průřezu [m]
K	- Modul průtoku
L	- Délka po směru toku [m]
m	- Hmotnost [g]
n	- Drsnostní součinitel [-]
N-letý průtok	- Průtok s pravděpodobností opakování jednou za N let
O	- Omočený obvod [m]
p	- Tlak [Pa]
PPO	- Protipovodňová opatření
Q	- Průtok [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]
R	- Hydraulický poloměr [m]
S_f	- Sklon čáry energie
SPA	- Stupeň povodňové aktivity

t	- Jednotka času [s]
Z	- Geodetická výška dna toku [m n. m.]
ZABAGED	- Základní báze geografických dat České republiky
α	- Coriolisovo číslo
ν	- Kinematická viskozita [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$]

SEZNAM PŘÍLOH

- [B.1] Situace širších vztahů
- [B.2] Podrobná situace
- [B.3] Mapa rozlivů Q5 – srovnání
- [B.4] Mapa rozlivů Q20 – srovnání
- [B.5] Mapa rozlivů Q100 – srovnání
- [B.6] Mapa hloubek Q5
- [B.7] Mapa hloubek Q20
- [B.8] Mapa hloubek Q100
- [B.9] Mapa rychlostí Q5
- [B.10] Mapa rychlostí Q20
- [B.11] Mapa rychlostí Q100
- [B.12] Situace s PPO
- [B.13] Vzorový příčný profil s PPO